

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI  
**TOIMETISED**

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ  
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS

534

**ИЗМЕРЕНИЯ И ПОМЕХИ**

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

XI

TARTU RIIKLIKU ÜLIKOOLI TOIMETISED  
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ  
ТАРТУСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ACTA ET COMMENTATIONES UNIVERSITATIS TARTUENSIS  
ALUSTATUD 1893.a. VIINIK 534 ВЫПУСК ОСНОВАНЫ В 1893.г.

# ИЗМЕРЕНИЯ И ПОМЕХИ

ИОНИЗАЦИЯ, АЭРОЗОЛИ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

XI

ТАРТУ 1980

Редакционная коллегия: К. Куду, Я. Рейнет, О. Сакс.  
Ответственный редактор Х. Корге.

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МАЛЫХ ТОКОВ

М.Х. ЛНСС

Известно [1], что передаточную функцию любого измерительного преобразователя (ИП) с любой желаемой точностью можно выразить в следующем виде:

$$\Phi(p) = c \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + 1}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + 1}, \quad (1)$$

где некоторые высшие коэффициенты  $a_n, \dots$  могут быть и равными нулю. Эта функция содержит полную информацию о динамических свойствах ИП. Путем изменения вида этой функции или путем изменения постоянных  $a_k, b_k$ , но сохраняя при этом вид этой функции, можно корректировать динамику ИП и получить переходной процесс желаемого качества. Связанные с этим проблемы глубоко и всесторонне рассматриваются в руководствах по теории автоматического регулирования.

Для повышения быстродействия электрометров (под электрометром понимаем здесь электрометрический измеритель малых токов с измерительным резистором в цепи обратной связи) нашли применение следующие 4 основных метода коррекции: уменьшение коэффициентов в передаточной функции, сложение и умножение (деление) операторных чувствительностей, и метод частотнозависимой обратной связи. Ниже на основе обзора отечественной и зарубежной литературы подробнее рассматривается практическая реализация этих методов, приводятся эквивалентные схемы и передаточные функции электрометра, которые служили основой для создания схем компенсации. Далее показано, что при более точном определении передаточной функции можно известными методами значительно увеличить быстродействие электрометра.

Передаточная функция  $\Phi(p)$  электрометра (рис. 1а) выражается в следующем виде

$$\Phi(p) = -K \frac{z_1(p) \cdot z_2(p)}{z_1(p) + z_2(p) \cdot (1 + K\beta)}, \quad (2)$$

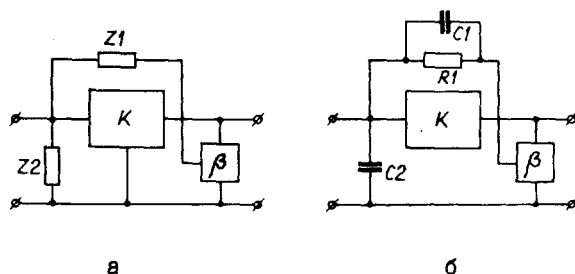


Рис. 1. Эквивалентные схемы электрометров.

где  $K$  - коэффициент усиления усилителя. В быстродействующих электрометрах стремятся применить усилители с достаточно широкой полосой пропускания, так что  $K$  можно считать частотнонезависимым.

$z_1(p)$  - включает в себя импеданс измерительного резистора, паразитные монтажные емкости между входом и выходом усилителя, и сопротивления изоляторов, шунтирующие измерительный резистор. Иногда в схеме электрометра измерительный резистор представляют в виде трехполюсника, содержащего распределенную емкость на корпус. При экранировании резистора экраном на потенциале одного из выводов резистора, схема преобразуется в вид, представленный на рис. 1а. Поэтому выражение (2) в этом смысле можем считать достаточно общим.

$z_2(p)$  - включает в себя входной импеданс усилителя, сопротивления и емкости изоляторов, монтажа, кабеля и самого источника измеряемого тока.

$\beta$  - коэффициент обратной связи.

На рис. 1б изображена уточненная схема электрометра, которая является наиболее распространенной при анализе быстродействия электрометров. Согласно этой схеме при замене в (2)

$$z_1(p) \rightarrow \frac{R_1}{R_1 C_1 p + 1}$$

$$z_2(p) \rightarrow \frac{1}{C_2 p}$$

и допуская, что  $K \gg 1$ ,  $g(p)$  преобразуется в

$$g(p) = \frac{R_1}{\beta} \frac{1}{T_1 p + 1}, \quad (3)$$

где

$$T_1 = R_1 \left( C_1 + \frac{C_2}{1 + K\beta} \right). \quad (4)$$

Очевидно, что наиболее естественным способом увеличения быстродействия является уменьшение емкостей  $C_1$  и  $C_2$ . В случае многопредельных электрометров с набором из нескольких измерительных резисторов особое внимание следует обратить на емкость  $C_3$ , введенную в цепь обратной связи контактами переключателя резисторов (рис. 2). Для уменьшения ее следует уменьшить их размеры (игольчатые переключатели) или применить переключатели специальной конструкции, в которых емкость между контактами шунтируется эквипотенциальным экраном между разомкнутыми контактами /2/. Наилучшие результаты дает подключение отключенных от входа усилителя контактов на корпус /3, 4/.

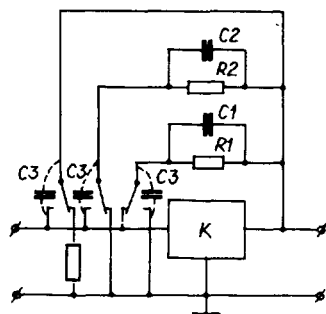


Рис. 2. Нейтрализация паразитных емкостей переключателя измерительных резисторов.

При рациональном монтаже электрометра  $C_1$  можно довести до уровня емкости выводов измерительного резистора, который для разных типов и экземпляров лежит в пределах 0,1–0,3 пФ. Дальнейшего уменьшения этой емкости можно добиться пропусканьем резистора через заземленный экран /4/ (рис. 3а). Этот экран создает вокруг резистора и в самом резисторе тормозящее электрическое поле, оптимальная форма которого достигается путем экспериментального определения формы и расположения экрана на резисторе.

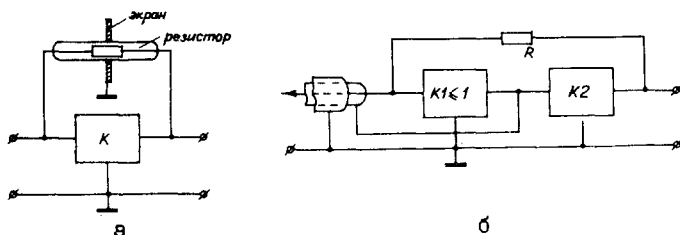


Рис. 3. Экранирование измерительного резистора (а) и входного кабеля (б).

Влиянием входной емкости  $C_2$  в формуле (4) из-за большого  $K$  можно обычно пренебречь. При длинных кабелях  $C_2$  достигает сотни пикофарад и в этих случаях применяют кабели с двойной экранировкой /5/. На внутренний экран подают положительную обратную связь глубиной  $K_1 \leq 1$  (рис. 3б).

Метод сложения операторных чувствительностей, хотя и реферирован в /2/, не нашел в электрометрах широкого применения. Согласно этому методу последовательно электрометру (рис. 4а) с передаточной функцией /3/ подключают дифференцирующий усилитель с передаточной функцией

$$K_2(p) = -K_2 \frac{T_2 p}{T_2 p + 1}$$

и выходные сигналы электрометра и дифференцирующего усилителя суммируют. Передаточная функция системы в целом имеет вид

$$g_1(p) = K_1(p) + K_1(p) \cdot K_2(p),$$

что при выборе  $K_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$  и замене  $K_1(p) = g(p)$  из (3), дает

$$g_1(p) = \frac{R_1}{\beta} \frac{1}{T_2 p + 1}.$$

Выходной сигнал системы устанавливается с заранее заданной постоянной времени  $T_2$ .

Согласно методу умножения операторных чувствительностей на выход корректируемого ИП включают вспомогательную цепь с

такой передаточной функцией  $K_2(p)$ , что произведение  $K_2(p)$  с передаточной функцией ИП  $K_I(p)$  имело бы желаемый для нас вид

$$g_1(p) = K_1(p) \cdot K_2(p).$$

Для системы на рис. 4б /6/ при замене  $K_I(p) = g(p)$  из (3)

$$g_1(p) = \frac{R_1}{\beta} \frac{1}{T_1 p + 1} \frac{R_2 (R_1 C_1 p + 1)}{(R_1 + R_2) \left( 1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2 p \right)}.$$

Если  $T_I = R_1 C_1$ , то

$$g_1(p) = \frac{R}{\beta} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{T_2 p + 1},$$

где новую постоянную времени  $T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_2$  можно сделать сколь угодно маленькой с уменьшением  $R_2$ . Однако при этом уменьшается установившийся выходной сигнал.

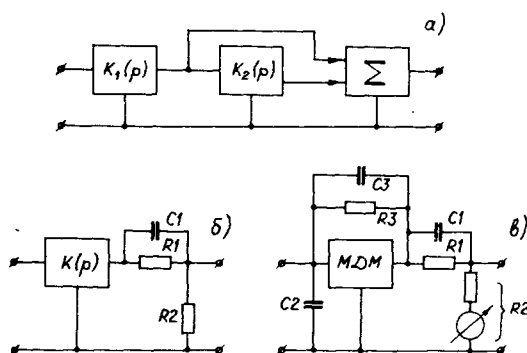


Рис. 4. Коррекция при помощи сложения (а) и умножения (б, в) операторных чувствительностей

Этот метод, как и предыдущий, не нашел широкого применения. На наш взгляд, метод хорошо применим для ускорения по-



казания стрелочного выходного прибора в динамических электрометрах, а также в других случаях, где постоянная времени в цепи обратной связи (или в самом усилителе) значительна и для соблюдения монотонности переходного процесса ее нельзя уменьшить. В качестве  $R_2$  может служить само внутреннее сопротивление индикаторного прибора, или суммарное сопротивление прибора и последовательно с ним включенного резистора (рис. 4в).

Наиболее распространенным методом повышения быстродействия электрометра является применение частотнозависимой обратной связи.

В 1952 году Пелхович /7/ предложил применить в цепи отрицательной обратной связи частотнозависимый делитель с коэффициентом передачи

$$\beta(p) = \frac{1}{T_2 p + 1}.$$

Если  $T_2$  выбрать равным постоянной времени  $T_1$ , то согласно (3)  $g(p)$  становится частотнонезависимым. Экспериментальные исследования показывают, что лучшие результаты можно получить, если в делитель обратной связи ввести дополнительную емкость  $C_4$  /8/ (рис. 5а) или сопротивление  $R_3/3$ , 9/ (рис. 7б).

Коэффициент передачи обеих цепей одинаков

$$\beta(p) = \frac{T_3 p + 1}{T_2 p + 1},$$

где  $T_3 = R_2 C_4$  и  $T_2 = R_2(C_2 + C_4)$  для делителя на рис. 7а, и  $T_3 = R_3 C_2$ ,  $T_2 = C_2(R_2 + R_3)$  для делителя на рис. 5б.

Следует заметить, что в неявном виде такой цепи коррекции соответствует эквивалентная схема измерительного резистора на рис. 5а:

$$z_1(p) = \frac{R_1(R_5 C_1 p + 1)}{(R_1 + R_5) C_1 p + 1}.$$

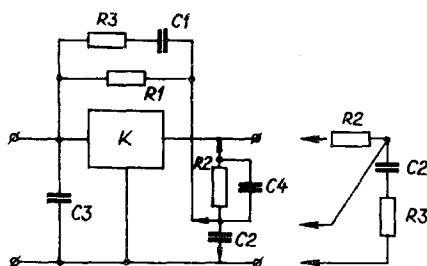


Рис. 5. Коррекция при помощи частотозависимой отрицательной обратной связи.

Согласно (3) при условии  $z_1(p) \sim \beta(p)$  получим  $\varphi(p)$  частотонезависимым.

В исследованиях /8, 10, 11, 12, 13/ через небольшую емкость (0,1 ÷ 0,5) пФ на вход электрометра подается дополнительная положительная обратная связь (рис. 6). Для этой схемы

$$\varphi(p) = \frac{R_1}{R_1 (C_1 - \alpha C_3) p + 1} \quad (5)$$

При выполнении условия

$$C_1 = \alpha C_3$$

передаточная функция  $\varphi(p)$  становится частотонезависимой.

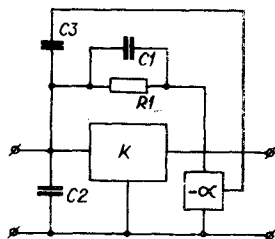


Рис. 6. Коррекция при помощи положительной обратной связи.

Прилуцкий /14/ применил с целью регулирования быстродействия электрометра более сложную цепь обратной связи, содержащую сумматор и звено коррекции с коэффициентами передачи  $A$  (рис. 7а). Если здесь выбрать  $A$  из условия

$$A = a \cdot A(p) = a \left( \frac{1}{K_1(p)} - 1 \right),$$

где  $K_1(p)$  коэффициент передачи делителя  $C_2$ ,  $R_2 \parallel C_1$ , то

$$\varphi(p) = \frac{R_1}{R_1(C_1 + aC_2)p + 1}. \quad (6)$$

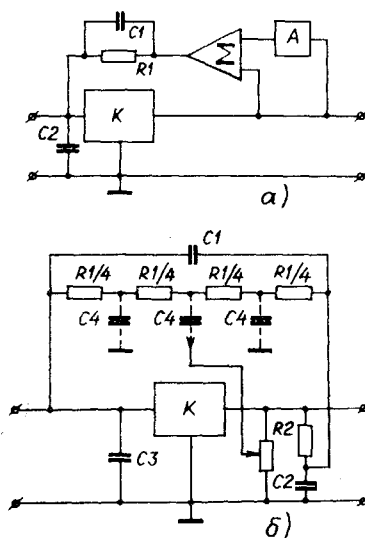


Рис. 7. Коррекция методами Прилуцкого (а) и Кендалла (б).

Постоянную времени системы  $T = R_1(C_1 + aC_2)$  с соответствующим выбором величины и знака  $a$  можно сделать сколь угодно малой.

Если не обратить внимания на то, что эффект получен при

помощи обратной связи, последние две схемы можно отнести также к ранее реферированному методу уменьшения коэффициентов. Действительно, вид передаточной функции в (5) и (6) не изменился, а изменению подвергается постоянная времени.

В /15/ было сделано допущение о том, что  $Z_1(p)$  имеет эквивалентную схему, изображенную на рис. 7б, согласно которой Кендалл /16/ в своем электрометре подал дополнительную обратную связь через монтажную емкость на среднюю точку измерительного резистора. Оптимальные размеры экранов на резисторе и глубина обратной связи были найдены экспериментально.

Мы допускаем, как многие исследователи, что с физической точки зрения более близкой, чем приведенные на рис. 1а и рис. 5 эквивалентные схемы измерительного резистора, может быть схема, характеризующаяся распределенной емкостью на один из его выводов, однако такая схема слишком сложна для сознательного создания систем компенсаций. На основе наших экспериментальных исследований считаем сомнительным эффект от использованных некоторыми авторами экранов для уменьшения распределенной емкости.

Так как авторы статей, как правило, воздерживаются приводить осциллограммы экспериментальных исследований, мы не можем на основе литературного обзора строго характеризовать практические возможности реферированных методов. Можем только сказать, что экспериментальные и теоретические результаты во всех случаях значительно расходятся. Время нарастания выходного сигнала до уровня 90% от установившегося при ступенчатом входном сигнале никем не было получено меньше миллисекунды при измерительном резисторе  $10^{12}$  Ом.

Нашей задачей в данной работе было выяснение причины этого расхождения и по возможности его уменьшения.

Наши экспериментальные исследования показали, что при измерительных резисторах  $10^{11}$ ,  $10^{12}$  Ом допущение о частотной независимости коэффициента усиления усилителя хорошо соответствует действительности. Усилия были направлены на более точное определение эквивалентной схемы измерительного резистора и его компенсации одним из известных методов.

Согласно /17, 18/ по экспериментальной кривой переходной функции можно определить соотношение между показателями степени в числителе и знаменателе передаточной функции (I). В переходном процессе электрометра наблюдается скачок первой

производной этой функции, причем сама переходная функция скачка не имеет. Из этого можно делать вывод, что в выражении (1)

$$a_n = 0. \quad (7)$$

В наиболее простом случае

$$\Phi(p) = C \frac{1}{b_1 p + 1} \rightarrow R \frac{1}{T_1 p + 1}.$$

Как выяснилось выше, передаточная функция такого типа недостаточно описывает резистор. Сделаем предположение о том, что резистор характеризуется следующей функцией, удовлетворяющей условия (7) /19/:

$$z_1(p) = C \frac{a_1 p + 1}{b_2 p^2 + b_1 p + 1} \rightarrow R \frac{T_1 p + 1}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}.$$

Эквивалентная схема электрометра с таким  $z_1(p)$  изображена на рис. 8. Там же изображена цепь обратной связи, позволяющая скорректировать передаточную функцию электрометра:

$$\beta(p) = \frac{R_4 C_3 p + 1}{R_3 C_3 R_4 C_4 p^2 + (R_4 C_3 + R_3 C_4 + R_3 C_3) p + 1}.$$

Экспериментальный макет электрометра имел цепи (обратной связи) со следующими параметрами  $R_3 = 25 \text{ кОм}$ ,  $R_4 = 65 \text{ кОм}$ ,  $C_3 = 2 \text{ мкФ}$ ,  $C_4 = 0,5 \text{ мкФ}$ .

Осциллограммы выходного сигнала на ступенчатое изменение входного тока изображены на рис. 9а с разверткой 0,1 мс/деление и на рис. 9б с разверткой 1 мс/деление. Время установления выходного сигнала от 10% до 90% установившегося показания не превышает 150 мкс, что дает для частотного диапазона пропускания 2000 Гц.

При дальнейшей коррекции, по-видимому, нельзя пренебрегать частотной зависимостью коэффициента усиления собственного усилителя. При этом значительно усложняется конструкция

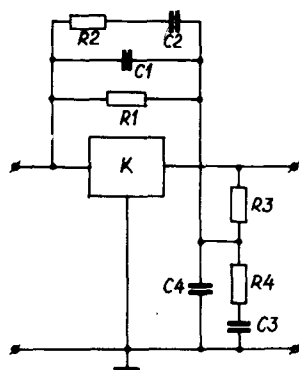


Рис. 8. Усовершенствованная эквивалентная схема  
электронметра с цепью коррекции.

цепей коррекций и методика их настройки. В рамках этой работы ограничились достигнутым. В /20/ описан метод машинного

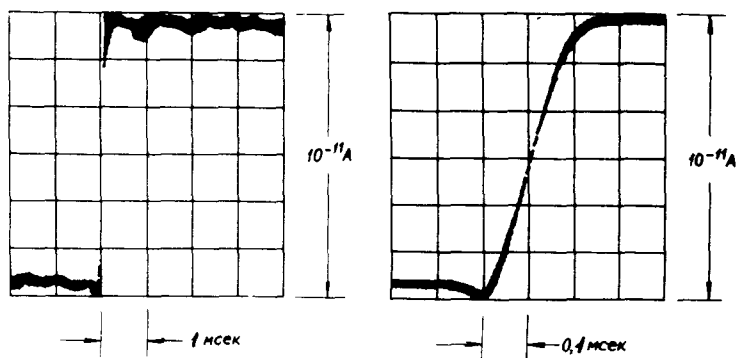


Рис. 9. Реакции скорректированного электронметра на  
ступенчатое изменение входного тока.

определения значений элементов, предложенный в настоящем приближении эквивалентной схемы (рис. 8).

## Л и т е р а т у р а

- I. Симоу М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования. - Автоматика и телемеханика, 1957, № 6, с. 514-528.
2. Илькович А.М. Техника электрометрии. М., Энергия, 1976, 399 с.
3. Вейнбергер Р. Расчет и конструкция специальных электрометрических схем. - Электроника (перевод с английского), 1971, № 18, с. 40-46.
4. Brookshier W.K., Electrometer Circuit Design for Extended Band Widths. - Nuclear Instruments and Methods, 1964, Vol. 2, No. 25, pp. 317-327.
5. Presley S.P., Fast Response Picoammeter. - Review of Scientific Instruments, 1966, Vol. 37, No. 5, pp. 643-648.
6. Еремин А.П. Повышение быстродействия электрометров. - Измерительная техника, 1969, № 3, с. 44-46.
7. Pelchowith T., Zaalberg van Zelst T.T., A Wide-Band Electrometer Amplifier. - Review of Scientific Instruments, 1952, No. 2, pp. 73-75.
8. Паршин А.В., Романова Н.Н., Устинова Л.Б. Методы уменьшения постоянной времени входной цепи электрометрических усилителей. - Приборы и техника эксперимента, 1964, № 3, с. 88-94.
9. Беризин Л.Ф. Электрометрический усилитель на полевом транзисторе и интегральной микросхеме. - Приборы и техника эксперимента, 1973, № 5, с. 150-151.
10. Эрглис А.Э., Янсон У.В. Усилитель с нейтрализацией входной емкости. - Приборы и техника эксперимента, 1976, № 1, с. 129-130.
- II. Cohn C.E., Improving the Dynamic Behavior of Ion-Chamber Current Amplifiers. - Trans. American Nuclear Society, 1961, No. 1, p. 23.
12. Dever I.A., Siclas L., A High-Speed Microcurrent Amplifier. - Communication and Electronics, 1960, No. 50 (Sept), pp. 375-377.
13. Johnstone B.M., Pugsley Y.P., A Negative Capacitance

- Preamplifier for Electrophysiological Use. - Electronic Engineering, 1960, July, pp. 422-424.
14. Прилуцкий Р.Е. Метод регулирования быстродействия электрометрического усилителя. - Приборы и техника эксперимента, 1974, № 2, с. 130-132.
  15. Kendall B.R., Zabielski M.F. Compensated Resistors for High Frequency Electrometer Applications. - Electronic Letters, 1970, Vol. 6, No. 26, pp. 776-779.
  16. Kendall B.R., Reiter R.F., Three Terminal Shielded Resistor for Fast Electrometers. - Review of Scientific Instruments, 1974, No. 6, pp. 129-130.
  17. Бакланов В.Ф., Леонов В.Б., Скорик Г.С. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных систем по экспериментальным кривым переходного процесса. - Измерительная техника, 1975, № 2, с. 35-37.
  18. Бодров В.И., Чертков Н.К. Определение дифференциального уравнения объекта по его временной характеристике. - В кн.: Анализ и синтез систем автоматического управления. М., 1966.
  19. Ансо М.А. Исследование быстродействия линейного электрометра. - Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции, посвященной дню радио. Секция Проблемы измерительного приборостроения. Таллин, 1979.
  20. Ансо М.А. Метод идентификации высокоомного измерительного резистора на ЭВМ. - В настоящем сборнике.

#### METHODS OF IMPROVING OF HIGH SPEED MICRO-CURRENT MEASUREMENTS

M. Anso

#### S u m m a r y

An analytical review of high speed micro-current measurements is given. It becomes evident that the result of frequency compensation depends on the accuracy of the equivalent circuit of shunt resistor we use. On the basis of theoretical and experimental data an improved equivalent circuit is given. It made it possible to obtain about 10 times higher speed.



## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЫСОКОМОМОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РЕЗИСТОРА НА ЭВМ

М.Х. Ансо

Измерительную систему можно в динамическом смысле считать известной, если известна ее физическая модель (эквивалентная схема) или одна из последующих математических моделей, содержащих полную информацию о динамике системы: дифференциальное уравнение (система дифференциальных уравнений), импульсная или переходная характеристика, передаточная функция, амплитудно-фазочастотные характеристики /1/. Известен ряд методов непосредственного определения на основе экспериментальных данных той или иной математической модели системы (см. напр. /2/), от которой возможен переход к любой другой из них.

Мы сделали попытку на основе экспериментальной записи переходной характеристики электрометра определить непосредственно величины элементов эквивалентной схемы измерительного резистора /3/. При этом сделано допущение о том, что передаточная функция  $g(p)$  и тем самым переходная характеристика электрометра  $g(t)$  полностью определены импедансом измерительного резистора

$$g(p) = z(p).$$

На основе значений элементов эквивалентной схемы измерительного резистора легко создать делитель обратной связи (рис. 1б), который позволяет скорректировать передаточную функцию электрометра. Действительно, если в эквивалентной схеме резистора обозначить часть, включенную параллельно с омическим сопротивлением, через  $z_1(p)$ , то

$$z(p) = \frac{R_1 z_1(p)}{R_1 + z_1(p)}$$

и делитель обратной связи с передаточной функцией

$$\beta(p) = \frac{\frac{z_1(p)}{K}}{\frac{R_1}{K} + \frac{z_1(p)}{K}},$$

где  $\frac{1}{K}$  - масштабный множитель,

превратит передаточную функцию электрометра  $g(p)$  из комплексной  $z(p)$  в реальную величину  $R_1$ , т.е.  $g(p)$  скорректирована :

$$g(p) = \frac{z(p)}{\beta(p)} = R_1.$$

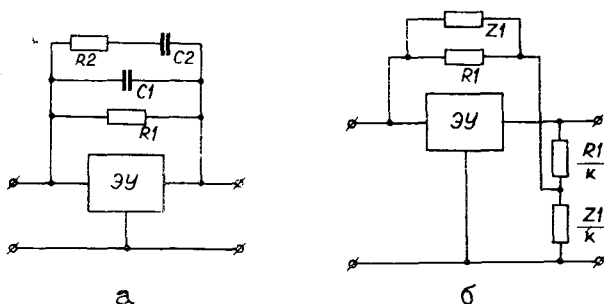


Рис. 1. Эквивалентные схемы нескорректированного (а) и скорректированного (б) электрометров.

Переходная характеристика нескорректированного электрометра (рис. 1 а) выражается в следующем виде:

$$g(t) = R_1 \left[ 1 + \frac{T_3 - T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right],$$

где  $t$  - время,

$$T_3 - R_2 C_2,$$

$T_1$  и  $T_2$  - корни полинома  $R_1 C_1 R_2 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2)p + 1$ .

Нам  $g(t)$  дана в виде набора экспериментальных точек  $g_i(t_i)$  и относительно неизвестных  $C_1, R_2, C_2$  ( $R_1$  считаем известным) надо решить систему уравнений:

$$g_i(t_i) = R_1 \left[ 1 + \frac{T_3 - T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right], \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, n.$$

Число экспериментальных точек  $n$  может намного превысить число неизвестных, однако из-за экспериментальных ошибок и собственных помех в электрометре система противоречива и точное решение отсутствует. Для нахождения приближенного решения системы (I) мы применили метод наименьших квадратов. В случае случайной помехи и ошибок при определении  $g_i(t_i)$  найденное этим методом решение будет наиболее вероятным. Преимуществом этого метода решения системы (I) является также то, что к большинству ЭВМ прилагается стандартная программа решения системы линейных уравнений методом наименьших квадратов, и составление программы в целом значительно упрощается.

Система (I) нелинейна и для линеаризации ее применим метод, изложенный в [4,5]. Метод заключается в разложении правой части формулы (I) в ряд Тейлора вблизи точки  $(C'_1, R'_2, C'_2)$ , которую считаем приближенным решением. Ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получим новую, линейную систему уравнений:

$$g_i(t_i) - g(t_i) = \frac{\partial g(t_i)}{\partial C_1} \Delta C_1 + \frac{\partial g(t_i)}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial g(t_i)}{\partial C_2} \Delta C_2,$$

причем  $g(t_i)$  и ее производные взяты в точке  $(C'_1, R'_2, C'_2)$ .

После решения этой системы методом наименьших квадратов относительно  $\Delta C_1, \Delta R_2, \Delta C_2$  получим новое, более точное решение

$$C_1'' = C_1' + \Delta C_1$$

$$R_2'' = R_2' + \Delta R_2$$

$$C_2'' = C_2' + \Delta C_2$$

и повторяем процедуру решения пока  $\Delta C_1, \Delta R_2, \Delta C_2$  не становятся достаточно малыми для нас. Если исходная точка  $(C'_1, R'_2, C'_2)$  взята внутри области сходимости итерационной процедуры, решение с точностью не хуже 1% получается через 3-5 итерации. Однако область сходимости не широка. Можем рекомендовать следующий прием для определения исходной точки, который в нашем случае всегда вел к сходимости. Из экспериментальных точек найдем ту, при которой

$$g_m(t_m) \approx 0,7 g_n(t_n)$$

и определим

$$\begin{aligned} C'_1 = C'_2 &= \frac{t_m}{R_1}, \\ R'_2 &= R_1. \end{aligned}$$

Для исследования метода относительно шума мы моделировали на расчетной переходной кривой гауссовый шум со среднеквадратичным отклонением 5% от установившегося значения (т.е. двойная амплитуда составляет 25%). При количестве точек (уравнений в системе (I))  $n = 50$  такой шум не привел к заметному сужению области сходимости. При этом неточность сходимости не превышала 1%. Благодаря этому, изложенный метод хорошо применим также для обнаружения малых изменений в передаточной функции при значительном шуме.

### Л и т е р а т у р а

1. Грановский Б.А. Методы обработки экспериментальных данных при определении динамических характеристик средств измерений. - Метрология, 1975, № 1, с. 3-20.
2. Иванова М.А. Определение дифференциального уравнения исследуемого процесса по экспериментальной кривой. - Измерительная техника, 1979, № 6, с. 20-22.
3. Ансо М.Х. Методы повышения быстродействия электрометрических измерителей малых токов. В настоящем сборнике.
4. Лудсон Д. Статистика для физиков. М., Мир, 1970, 296 с.
5. Vöhandu L., Tamme L., Luht I., Arvutusteetodid. Tln., Valgus, 1971, 373 lk.

METHOD OF IDENTIFICATION OF SHUNT RESISTOR  
IN HIGH SPEED ELECTROMETERS

M. Anso

S u m m a r y

A method of identification of shunt resistor on the basis of experimental data of transient characteristic is given. The method bases on finding a least-square solution of a system of non-linear equations. The convergence accuracy and limit have low dependence on noise.

# АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА С НАТЯНУТОЙ МЕМБРАНОЙ

Ю.А. Ляммалов

Хотя в литературе описан ряд конструктивных решений динамических конденсаторов (ДК) с электростатическим возбуждением, их работе уделено мало внимания. Лишь в работе /1/ приведено теоретическое рассмотрение одной такой конструкции с целью вывода условий колебания механической системы ДК под действием высокочастотного электрического поля.

ДК с электростатическим возбуждением можно принципиально представить в виде двух неподвижных пластин 2 и 3 (рис. 1) и одной колеблющейся пластины 1, которая закреплена по краю. Пластины 1, 2 и 3 обычно выполняются круглой формы, реже - прямоугольной и ленточной формы. В дальнейшем будем рассматривать пластины 1, 2 и 3 только круглой формы.

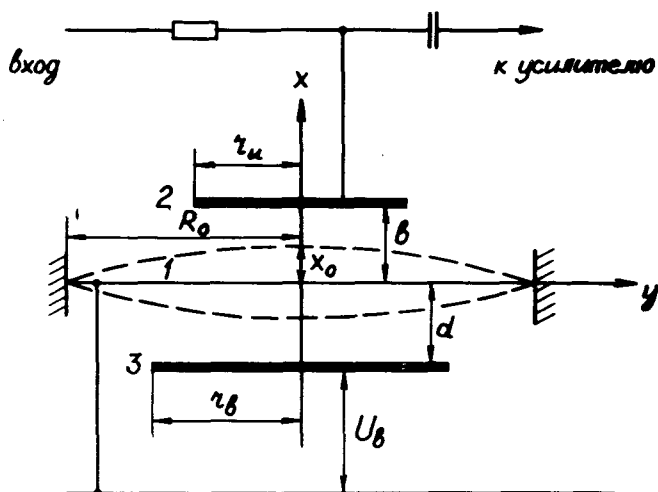


Рис. 1. Схематический рисунок ДК с электростатическим возбуждением.

Емкость  $C_u$  измерительного конденсатора образуется между пластинами 1 и 2. Последний включен во входную цепь электрометрического усилителя согласно рис. 1. Пластины 1 и 3 обра-

зуют конденсатор возбуждения с емкостью  $C_6$ , на который подается периодическое напряжение возбуждения

$$U_6 = U_{60} \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $U_{60}$  - амплитудное значение напряжения  $U_6$ ;  
 $\omega$  - его круговая частота;  
 $t$  - время.

В дальнейшем емкость  $C_u$  назовем измерительным конденсатором, емкость  $C_6$  - конденсатором возбуждения, а в целом прибор - динамическим конденсатором.

При подаче на конденсатор  $C_6$  периодического напряжения  $U_6$ , между пластинами 1 и 3 возникает периодическая сила притяжения  $F$ , выражаемая формулой

$$F = \frac{\epsilon_0 S}{4d^2} U_{60}^2 (1 + \cos 2\omega t), \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная;  
 $S = \pi r_3^2$  - площадь пластины 3;  
 $d$  - расстояние между пластинами 1 и 3.

Из (2) видно, что сила  $F$  имеет два компонента: постоянный

$$F_0 = \frac{\epsilon_0 S}{4d^2} U_{60}^2 \quad (3)$$

и переменный

$$F_{\sim} = \frac{\epsilon_0 S}{4d^2} U_{60}^2 \cos 2\omega t = F_0 \cos 2\omega t, \quad (4)$$

частота изменения которого вдвое больше частоты изменения напряжения возбуждения  $U_6$ .

В электростатических ДК в качестве колеблющейся пластины нашли применение металлические однородно натянутые мембраны и тонкие пластинки, последние, как правило, из хрупких материалов.

Основная частота собственных колебаний мембраны  $\nu_m$  и пластинки  $\nu_n$  в вакууме определяется формулами (5) и (6), соответственно:

$$\nu_m = \frac{1,2}{\pi R_o} \sqrt{\frac{T}{\tau}}, \quad (5)$$

$$\nu_n = \frac{h}{2R_o} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (6)$$

где  $R_o$  - радиус мембраны или пластинки;  
 $T$  - натяжение мембраны, т.е. сила натяжения, приходящаяся на единицу длины края мембраны;  
 $\tau$  - поверхностная плотность мембраны;  
 $h$  - толщина пластинки;;  
 $E$  - модуль Юнга;  
 $\rho$  - плотность материала пластинки;  
 $\mu$  - коэффициент Пуассона.

С выводом этих формул можно ознакомиться, например, в книге Релея /2/.

Сравнивая выражения (5) и (6), можно заключить следующее. Определяющую роль для основной собственной частоты пластинки играет отношение  $E/\rho$ , а также ее радиус  $R_o$ . Поэтому для получения высокой частоты  $\nu_n$  отношение  $E/\rho$  материала пластинки должно быть велико, в то время как радиус пластинки не должен быть большим. Например, по данным работы /1/, у пластинки из стекла с параметрами  $E = 6,9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho = 2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 0,3$ ,  $h = 145$  мкм,  $R_o = 7,5$  мм основная собственная частота колебаний  $\nu_n$  получается около 6 кГц. В случае мембраны из стали толщиной 11 мкм и радиусом  $R_o = 7,5$  мм при  $\nu_m = \nu_n = 6$  кГц натяжение  $T$ , согласно формуле (5), должно быть всего 33 Н/м. Поэтому для сохранения той же частоты собственных колебаний мембраны можно одновременно увеличить натяжение  $T$  и ее радиус  $R_o$ , а вместе с последним и радиус  $r_g$  - тем самым увеличится и коэффициент модуляции. Следовательно, для обеспечения нормального коэффициента модуляции ДК, при одинаковых частотах  $\nu_m$  и  $\nu_n$ , радиусы пластин 1, 2 и 3 (рис. 1) и расстояния между ними можно для мембраны взять большими, чем для пластинки, что в свою очередь упрощает конструкцию ДК.



Колебания мембраны или пластинки описываются дифференциальными уравнениями движения. При этом уравнение мембраны существенно отличается от уравнения движения пластинки. Отдельные вопросы колебания пластинки рассмотрены в работе [1], а в данной статье будут рассматриваться только колебания мембраны в ДК.

Определение смещения  $x$  мембраны от ее статического положения решением уравнения движения при действии на нее электростатических сил притяжения - сложная задача. Одним из путей упрощения этой задачи является замена колеблющейся мембраны более простой эквивалентной колебательной системой, например системой, состоящей из плоскопараллельной пластины и пружин, как показано на рис. 2. Замену при малых амплиту-

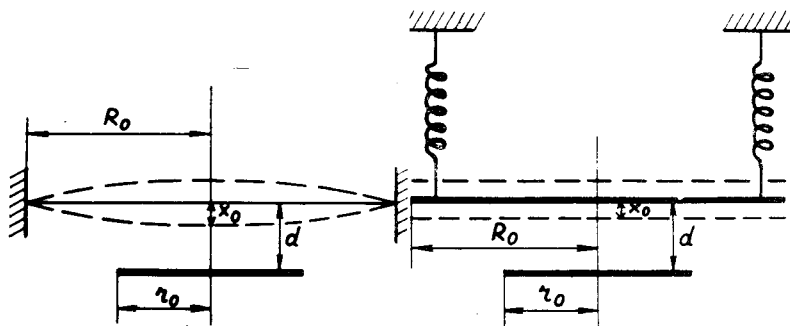


Рис. 2. Замена мембраны системой, состоящей из пружин и плоскопараллельной пластины.

дах  $x_0$  колебания мембраны, т.е. в случае  $x_0 \ll d$ , можно про- извести следующим образом. Сначала сосредоточим распределен- ную массу мембраны  $m$  и силу электростатического притяжения  $F$  в центр мембраны. Эквивалентная, сосредоточенная в центр мембраны масса  $m_{\text{эkv}}$  равна  $1/3 m$ , эквивалентная сила притя- жения  $F_{\text{эkv}}$  равна  $1/2 F$  [3]. Массу пластины пружинно-пла- стинчатой колебательной системы примем равной  $m_{\text{эkv}}$  и дейст- вующее на нее силу электростатического притяжения -  $F_{\text{эkv}}$ . Другие параметры, такие как  $R_0$ ,  $\tau_0$ ,  $x_0$  и  $d$ , при замене мембраны эквивалентной пружинно-пластинчатой колебательной системой, считаем неизменным. Пусть пружины имеют пока неоп- ределенную упругость  $\gamma$ .

При условии  $x_0 \ll d$  уравнение движения пружинно-пластинчатой системы имеет вид

$$m_{\text{экв}} \ddot{x} + \beta \dot{x} + \gamma x = F_{\text{экв}}, \quad (7)$$

где  $\ddot{x}$  и  $\dot{x}$  — первая и вторая производные по времени от смещения;

$\beta$  — коэффициент механического сопротивления.

Сила  $F_{\text{экв}} = I/2 F$ , где  $F$  определяется формулой (2). Стационарное решение уравнения (7) имеет следующий вид [4]:

$$x = x_0 \cos(pt - \varphi) + \frac{f_0, \text{экв}}{q}, \quad (8)$$

где

$$x_0 = \frac{f_0, \text{экв}}{\sqrt{(q^2 - p^2)^2 + 4p^2\beta^2}},$$

$$\varphi = \arctg \frac{2p\beta}{q^2 - p^2},$$

$$2\beta = \frac{\beta}{m_{\text{экв}}}, \quad q^2 = \frac{\gamma}{m_{\text{экв}}}, \quad f_0, \text{экв} = \frac{F_0, \text{экв}}{m_{\text{экв}}}, \quad p = 2\omega.$$

В выражении (8) величина  $q$  является собственной круговой частотой колебания пластины

$$q = \sqrt{\frac{\gamma}{m_{\text{экв}}}}. \quad (9)$$

Примем эту собственную круговую частоту пластины равной собственной круговой частоте [формула (5)], т.е.  $2\pi\nu_m = q$ . В результате получим значение упругости пружин  $\gamma = 6T$ .

В ДК колебания мембраны возбуждаются на основной собственной частоте, т.е. принимаем  $p = q$ . Подставляя в уравнение (8) соответствующие параметры мембраны, получим выражение для определения смещения  $x_m$  в центре мембраны

$$x_m = \frac{\epsilon_0 r_0^2}{48 d^2 T} U_{\text{в0}}^2 + \frac{1}{16} \frac{\epsilon_0 r_0^2}{\beta \omega d^2} U_{\text{в0}}^2 \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (10)$$

Видно, что при совпадении двойной частоты внешней силы с собственной частотой мембраны смещение  $x_m$  отстает по фазе от силы на угол  $90^\circ$ .

Из выражения (10) также видно, что смещение  $x_m$  обратно пропорционально коэффициенту сопротивления  $\beta$ , который в общем определен затуханием в окружающей среде и внутренним трением в самой мембране. Чтобы устранить затухающее влияние окружающей среды, ДК с электростатическим возбуждением обычно вакуумируют. В противном случае нужно было бы учесть упругие свойства воздуха также при определении собственных частот в формулах (5), (6) и (9).

В случае больших амплитуд колебания мембраны, когда условие  $x_0 \ll d$  не выполняется, пружинно-пластинчатая модель мембраны уже не удовлетворяет. Теперь сила притяжения между пластинами зависит от смещения  $x$  и выражение (3) нужно написать в виде

$$F_1 = \frac{\epsilon_0 S U_{00}^2}{4(d-x)^2} = F_0 \left(1 - \frac{x}{d}\right)^2, \quad (11)$$

где

$$F_0 = \frac{\epsilon_0 S U_{00}^2}{4d^2}.$$

Видно, что сила электростатического притяжения между плоскопараллельными пластинами пружинно-пластинчатой колебательной системы зависит от смещения  $x$  нелинейно и стремится к бесконечности при  $x \rightarrow d$  (кривая А на рис. 3), но при этом распределена равномерно по площади пластин.

Иную картину имеем в ДК при колебаниях мембраны. Выведенная под действием силы электростатического притяжения из статического положения мембрана имеет профиль, который можно представить формулой

$$x = x_0 \left(1 - \frac{y^2}{R_0^2}\right)^n, \quad (12)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

При  $n = 1$  профиль мембраны можно представить дугой окружности. Такой профиль мембраны имеет место при равномерном

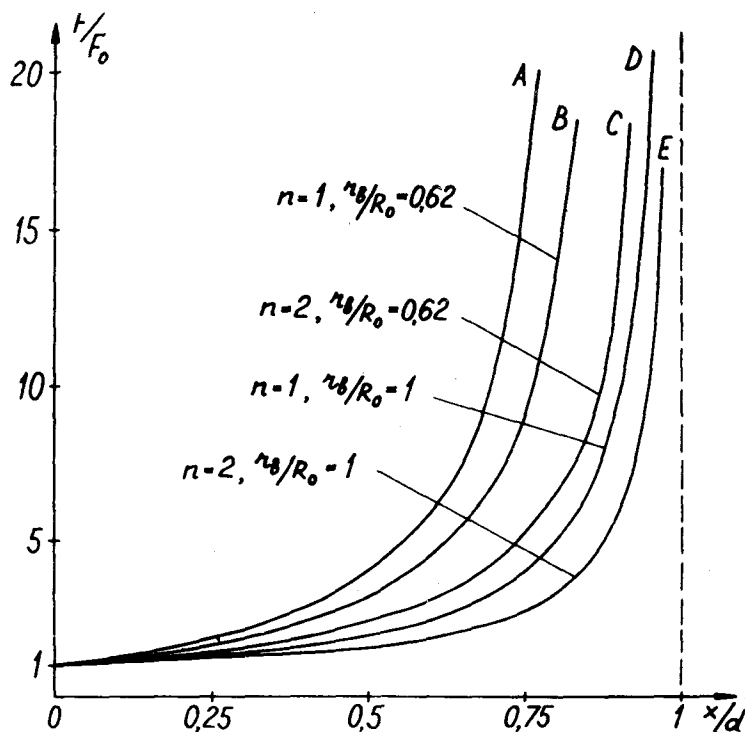


Рис. 3. Зависимость силы электростатического притяжения от смещения в конденсаторе возбуждения.

распределении действующей силы. В действительности же силы электростатического притяжения распределены в конденсаторе возбуждения неравномерно, а именно эти силы действуют сильнее в центре мембраны. В каждой точке мембраны сила электростатического притяжения уравнивается силой натяжения мембраны и упругими силами в ней. Это неравномерное распределение силы учитывается в формуле (12) параметром  $n$ .

Выражение (II) нужно для мембраны представить в дифференциальной форме.

$$dF_1 = \frac{\pi \epsilon_0 U_{\infty}^2}{2d^2} \frac{y dy}{\left[ 1 - \frac{x_0}{d} \left( 1 - \frac{y^2}{R_0^2} \right)^n \right]^2}. \quad (13)$$

Оказывается, что нелинейность силы  $F_1$  уменьшается с увеличением ее неравномерного распределения, т.е. с увеличением параметра  $n$ . Для этого представим выражение (I3) в интегральной форме

$$F_1 = \frac{\epsilon_0 \pi U_{B0}^2}{2d^2} \int_0^{r_0} \frac{y dy}{\left[1 - \frac{x_0}{d} \left(1 - \frac{y^2}{R_0^2}\right)^n\right]^2} \quad (I4)$$

Интеграл в (I4) для значений  $n = 1$  и  $n = 2$  табулирован и результаты расчета приведены при двух отношениях радиусов  $r_0/R_0 = 0,62$  и  $r_0/R_0 = 1$  на рис. 3 в виде кривых В, С, Д и Е. Значение  $r_0/R_0 = 0,62$  применено при конструировании динамического конденсатора ДК-79 /5/. Из этих кривых видно, что при увеличении параметра  $n$ , а также соотношения  $r_0/R_0$ , линейность силы притяжения увеличивается.

Пружинно-пластинчатая колебательная система может быть применена для описания работы мембраны при больших амплитудах колебания, если вместо параметра  $n$  ввести новую неопределенную величину  $\alpha$  следующим способом. В пружинно-пластинчатой системе сила притяжения между пластинами дана кривой А на рис. 3. Увеличиваем теперь расстояние  $d$  между пластинами в  $\alpha$  раз, т.е.  $d' = \alpha d$ , где  $\alpha$  - неопределенный параметр. Чтобы сила по формуле (II) осталась неизменной, нужно возбуждающее напряжение увеличить тоже в  $\alpha$  раз. Таким образом, формулу (II) можно представить в следующем виде

$$F_1' = \frac{\epsilon_0 5 U_{B0}^2}{4d^2 \left(1 - \frac{x}{\alpha d}\right)^2} \quad (II')$$

Этим способом будет использована только начальная часть кривой А (рис. 3). Пружинно-пластинчатую колебательную систему считаем эквивалентной мембране, если нелинейность начальной части кривой А совпадает с нелинейностью силы, действующей на мембрану и определяемую параметром  $n$  и отношением  $r_0/R_0$ .

Уравнение движения пружинно-пластинчатой колебательной системы нелинейное и имеет следующий вид:

$$m_{\text{экв}} \ddot{x} + \gamma x = \frac{\epsilon_0 S U_0^2}{4d^2 \left(1 - \frac{x}{\alpha d}\right)^2} (1 + \cos 2\omega t). \quad (15)$$

В дальнейшем будут рассматриваться только незатухающие нелинейные колебания. Вязкое затухание, которое принималось в расчет при малых амплитудах колебания, здесь, при колебаниях с большой амплитудой, уже не соответствует действительности. Дело в том, что в последнем случае затухание зависит уже от амплитуды колебания [6] и учитывать его в теоретических рассуждениях — сложная задача.

Уравнение (15) превращается в хорошо известное дифференциальное уравнение нелинейной колебательной системы, если заменить линейную упругую силу  $F_{y,л} = \gamma x$  нелинейной упругой силой  $F_{y,н}$ , а действующую на пластину внешнюю силу считать линейной от смещения  $x$ . Пусть в пружинно-пластинчатой колебательной системе на пластины приложено постоянное напряжение  $U$  такой величины, что выполняется условие  $x_0 \ll d$ . Тогда между пластинами возникает, согласно формуле (3), сила притяжения  $F_0 = \epsilon_0 S U^2 / 4d^2$ . Эта сила уравновешивается силой упругости пружин  $F_{y,л}$ . Пусть при данном напряжении  $U$  сила упругости  $F_{y,н}$  пружин меняется таким образом, что электростатическая сила притяжения действует по закону

$$F_1 = \frac{\epsilon_0 S U^2}{4d^2 \left(1 - \frac{x}{\alpha d}\right)^2}.$$

Сравнивая соотношения  $F_0/F_1$  и  $F_{y,л}/F_{y,н}$  получим следующее нелинейное выражения для  $F_{y,н}$

$$F_{y,н} = \frac{\gamma x}{\left(1 - \frac{x}{\alpha d}\right)^2}, \quad (16)$$

откуда после разложения в ряд имеем:

$$F_{y,н} = \gamma x \left( 1 + 2 \frac{x}{\alpha d} + 3 \frac{x^2}{\alpha^2 d^2} + 4 \frac{x^3}{\alpha^3 d^3} + \dots \right). \quad (16')$$

Ограничиваясь в этом разложении тремя первыми членами, уравнение (I5) можно представить в виде

$$\ddot{x} + gx + hx^2 + jx^3 = f(1 + \cos pt), \quad (I7)$$

где

$$g = \frac{\gamma}{m_{\text{экв}}}, \quad h = \frac{2\gamma}{\alpha d m_{\text{экв}}}, \quad j = \frac{3\gamma}{\alpha^2 d^2 m_{\text{экв}}},$$

$$f = \frac{\epsilon_0 S U_{\text{н}}^2}{4 d^2 m_{\text{экв}}}, \quad p = 2\omega.$$

Уравнение (I7) решается приближенными методами, например, методом последовательных приближений /7/. По этому методу решение уравнения (I7) в первом приближении ищут в виде  $x = x_0 \cos pt$ . Подставив последнее в уравнение (I7), после двукратного интегрирования получим выражение для первого приближения

$$x_1 = \frac{1}{p^2} \left( gx_0 + \frac{3jx_0^3}{4} - f \right) \cos pt + \frac{hx_0^2}{8p^2} \cos 2pt + \frac{jx_0^3}{36p^2} \cos 3pt. \quad (I8)$$

При этом постоянная составляющая  $x_{\text{пост}}$  в первом приближении имеет вид

$$x_{\text{пост}} = \frac{f}{g} - \frac{x_0^2 h}{2g}.$$

Здесь соотношение  $f/g$  равно постоянной составляющей при малых колебаниях (формула (8)), а соотношение  $x_0^2 h / 2g$  обусловлено квадратичным членом  $hx^2$  в уравнении (I7).

В методе последовательных приближений множитель перед  $\cos pt$  в выражении (I8) принимается равным амплитуде колебания  $x_0$ , т.е.

$$\frac{1}{p^2} \left( gx_0 + \frac{3jx_0^3}{4} - f \right) = x_0.$$

или

$$p^2 = g + \frac{3jx_0^2}{4} - \frac{f}{x_0}. \quad (I9)$$

Подставляя в уравнение (19) соответствующие параметры мембраны, можно его представить в следующем виде:

$$4\omega^2 = \frac{18T}{m} \left( 1 + \frac{9x_0^2}{4\alpha^2 d^2} \right) - \frac{3\pi\epsilon_0 r_b^2 U_{b0}^2}{8m d^2 x_0}. \quad (20)$$

Выражение (20) дает в плоскости  $\omega, x_0$  семейство кривых, для которых напряжение  $U_0$  играет роль параметра.

Например, для динамического конденсатора ДК-79 /5/ со стальной мембраной толщиной 11 мкм и параметрами  $T/m = 8 \cdot 10^7$  Н/м.кг,  $d = 40$  мкм,  $r_b = 8$  мм,  $m = 41$  мг,  $R_0 = 13$  мм, согласно формуле (20) получаются кривые, изображенные на рис. 4, где  $f_m = \omega/\pi$ . Кривые приведены для двух напряжений возбуждения:  $U_{b0} = 60$  В и  $U_{b0} = 80$  В. Параметр  $\alpha$  выбран таким образом ( $\alpha = 15$ ), чтобы нелинейность упругой силы не превышала 1% в точке  $x = d$ . Такой выбор параметра  $\alpha$  согласуется с экспериментальными данными /5/.

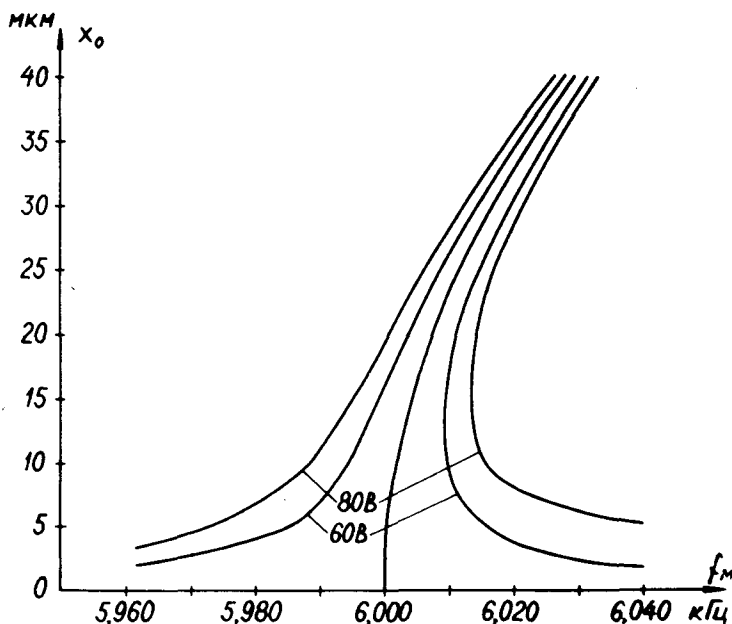


Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний мембраны от частоты возбуждения.



Если выбрать  $\alpha = 1$ , что соответствует случаю плоскопараллельного конденсатора с расстоянием  $d$  между пластинами, то кривые на рис. 4 растянулись бы при такой же собственной частоте, равной 6 кГц, на несколько килогерц. Отсюда следует интересный вывод. При использовании мембраны в конденсаторе возбуждения, его статическая плоскопараллельность в процессе колебания нарушается и тем самым сильно уменьшается нелинейность колебаний. Если бы удалось сконструировать такой плоскопараллельный конденсатор возбуждения, где в процессе колебания плоскопараллельность сохраняется, то такая система имела бы сильно выраженную нелинейную характеристику.

Определим теперь коэффициент модуляции ДК. Рассмотрим малые колебания мембраны, т.е. такие, при которых перераспределение силы в конденсаторе возбуждения не играет роли и поперечное сечение мембраны можно аппроксимировать по формуле (12), принимая  $n = 1$ , дугой окружности

$$x = x_0 \left( 1 - \frac{y^2}{R_0^2} \right). \quad (21)$$

Пусть мембрана выведена из статического положения; определим интегральную емкость между мембраной 1 и пластиной 2 (рис. 1). Для этого разделим мембрану и пластину на бесконечно большое количество окружностей с шагом  $dy$ . Выберем произвольно два противостоящих элемента с площадью  $dS$  на мембране и пластине и определим емкость между ними по следующему уравнению

$$dC_u = \frac{\epsilon_0 dS}{b} = \frac{\epsilon_0 y dy d\varphi}{b},$$

где  $d\varphi$  — бесконечно малый центральный угол элемента площади  $dS$ .

Интегральная емкость  $C_u$  определяется в этом случае следующим образом

$$C_u = \int_0^{r_u} \int_0^{2\pi} \frac{\epsilon_0}{b} y dy d\varphi.$$

В ДК никогда не выполняется условие  $x_0 \ll b$ , иначе он терял бы смысл как преобразователь постоянного напряжения в переменный, поэтому последнее выражение нужно написать в виде

$$C_u = \int_0^{r_u} \int_0^{2\pi} \frac{\epsilon_0}{b-x} y dy d\varphi = \frac{\epsilon_0}{b} \int_0^{r_u} \int_0^{2\pi} \frac{y dy d\varphi}{1 - \frac{x_0}{b} \left(1 - \frac{y^2}{R_0^2}\right)}.$$

После разложения знаменателя в ряд и интегрирования получим в первом приближении

$$C_u = \frac{\epsilon_0 \pi r_u^2}{b} \left[ 1 + \frac{x_0}{b} \left(1 - \frac{r_u^2}{2R_0^2}\right) \right]. \quad (22)$$

Статическая емкость измерительного конденсатора определяется формулой

$$C_{u,0} = \frac{\epsilon_0 \pi r_u^2}{b}. \quad (23)$$

Напряжение  $U$  на измерительном конденсаторе  $C_u$  определяется соотношением

$$U = \frac{C_{u,0} \cdot U_0}{C_u}, \quad (24)$$

где  $U_0$  — постоянное напряжение в статическом положении измерительного конденсатора.

Подставляя (22) и (23) в (24), получим

$$U = U_0 - U_0 \frac{x_0}{b} \left(1 - \frac{r_u^2}{2R_0^2}\right).$$

Напряжение  $U$  на измерительном конденсаторе состоит из постоянной составляющей  $U_0$  и переменной составляющей

$$U_0 \frac{x_0}{b} \left(1 - \frac{r_u^2}{2R_0^2}\right).$$

Коэффициент модуляции определяется как отношение переменной и постоянной составляющих напряжения на измерительном конденсаторе

$$M = \frac{U_0 \frac{x_0}{b} \left(1 - \frac{r_u^2}{2R_0^2}\right)}{U_0} = \frac{x_0}{b} \left(1 - \frac{r_u^2}{2R_0^2}\right).$$

Согласно этому выражению максимальные значения коэффициента модуляции  $M_{\max}$  в зависимости от соотношения  $r_u/R_o$  следующие: при  $r_u = R_o$   $M_{\max} = 0,5$ ;  $r_u = R_o/2$   $M_{\max} = 0,88$ ;  $r_u = R_o/3$   $M_{\max} = 0,96$ . Видно, что с уменьшением пластины 2 (рис. 1) коэффициент модуляции приближается к единице, как это имеет место в плоскопараллельном конденсаторе. В ДК-79  $r_u/R_o = 0,62$  и  $M_{\max} = 0,81$ .

В статическом положении мембрана находится на расстоянии  $b$  от пластины 2 (рис. 1), но в процессе колебания за среднее положение мембраны следует принимать положение, в котором к расстоянию  $b$  добавляется еще постоянная составляющая из выражения (10), т.е.

$$b + \frac{\epsilon_o r_u^2}{48 d^2 T} U_{bo}^2.$$

Заменяя  $x_o$  амплитудой переменной составляющей из выражения (10), получим для коэффициента модуляции

$$M = \frac{3 \epsilon_o r_u^2 T U_{bo}^2}{\beta \omega (48 b d^2 T + \epsilon_o r_b^2 U_{bo}^2)} \left( 1 - \frac{r_u^2}{2 R_o^2} \right). \quad (25)$$

В ДК-79 в широком диапазоне значений  $b$ ,  $r_b$ ,  $d$ ,  $T$  и  $U_{bo}$  выполняется условие

$$\frac{\epsilon_o r_b^2 U_{bo}^2}{48 d^2 T} \ll b,$$

поэтому вместо (25) можно написать упрощенную формулу:

$$M = \frac{\epsilon_o r_u^2 U_{bo}^2}{16 \beta \omega b d^2} \left( 1 - \frac{r_u^2}{2 R_o^2} \right). \quad (25')$$

При больших амплитудах колебания мембраны, когда уже сказывается перераспределение силы в конденсаторе возбуждения, смещение  $x$  определяется формулой (12) при  $n \gg 2$ . Максимальный коэффициент модуляции получается меньшим, чем при  $n = 1$ . Например, при  $n = 2$  коэффициент модуляции определяется выражением

$$M' = \frac{x_o}{b} \left( 1 - \frac{r_u^2}{R_o^2} + \frac{r_u^4}{3 R_o^4} \right).$$

Максимальное значение коэффициента модуляции равно при  $\nu_u = R_0$   $M'_{\text{макс}} = 0,33$ ;  $\nu_u = R_0/2$   $M'_{\text{макс}} = 0,77$ ;  $\nu_u = R_0/3$   $M'_{\text{макс}} = 0,89$ . В ДК-79  $\nu_u/R_0 = 0,62$  и  $M'_{\text{макс}} = 0,67$ .

Вышеприведенные расчеты носят приближенный характер, поэтому для точного расчета ДК с колеблющейся мембраной они малоприменимы. С другой стороны, точное решение хотя бы дифференциального уравнения движения мембраны при действии на нее электростатических сил притяжения, невозможно. Полученные расчеты, однако, качественно совпадают с экспериментальными данными /5/. Например, при изучении резонансных свойств колебания мембраны ДК-79 наблюдалось несовпадение резонансных кривых, снятых при повышении и понижении частоты /5/. Это явление, как показано выше, хорошо объясняется нелинейностью колебания мембраны.

### Л и т е р а т у р а

1. Van Nie A.G. Oscillator circuit for a vibrating capacitor driven by an RF electric field, IEEE Transaction: IM-21, 2, 1972, 153-161.
2. Стрэтт Дж. Е. (Рэлей). Теория звука. Т. I, М.-Л., 1940.
3. Фурдуйев Б.Б. Электроакустика, М.-Л., 1948.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле, М., 1967.
5. Сакс О.Б., Хяммалов Ю.А., Шор Б.Г. Динамический конденсатор с электростатическим возбуждением ДК-79. В настоящем сборнике.
6. Писаренко Т.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях, Киев, 1962.
7. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах, М., 1953.

AN ANALYSIS OF THE OPERATION OF AN ELECTROSTATIC  
DYNAMIC CAPACITOR WITH A TAUT MEMBRANE

J. Härmälöv

S u m m a r y

The paper presents an analysis of the operation of an electrostatic dynamic capacitor with a uniformly taut membrane. The design of such dynamic capacitors can be based on the results of this analysis.

The solution of the equation of motion of the membrane is mathematically a very complicated problem. For that reason in this paper the membrane has been replaced by a spring-mass vibratory system. At small vibration amplitudes the equation of motion of the spring-mass system is easily soluble. At great vibration amplitudes the system is nonlinear because of nonlinearity of the electrostatic attractive force. In this case the equation of motion of the system cannot be solved without the use of approximate methods of solution. In this paper the method of successive approximations has been used. It has been shown that the nonlinearity of vibrations of the membrane causes the bending of resonance characteristics.

The formula for the modulation coefficient of the dynamic capacitor with a uniformly taut membrane has been derived.

# ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДК-79

О.В. Сакс, Ю.А. Уяммалов, В.Г. Шор

Перед сектором электрометрии ПЛАЗ уже в течение ряда лет стояла задача разработать экономичный динамический конденсатор (ДК) с повышенной частотой модуляции. Вначале была предпринята попытка решить ее с помощью применения пьезокерамической системы возбуждения /1/. Была достигнута частота модуляции около 15 кГц, но по таким параметрам, как коэффициент модуляции и потребляемая мощность этот вариант явно не соответствовал современным требованиям, предъявляемым к ДК.

Ниже описывается конструкция разработанного авторами ДК-79 с электростатическим возбуждением, где в качестве колеблющегося элемента применена тонкая металлическая мембрана.

Схематический разрез ДК-79 представлен на рис. 1 (без вакуумируемого корпуса).

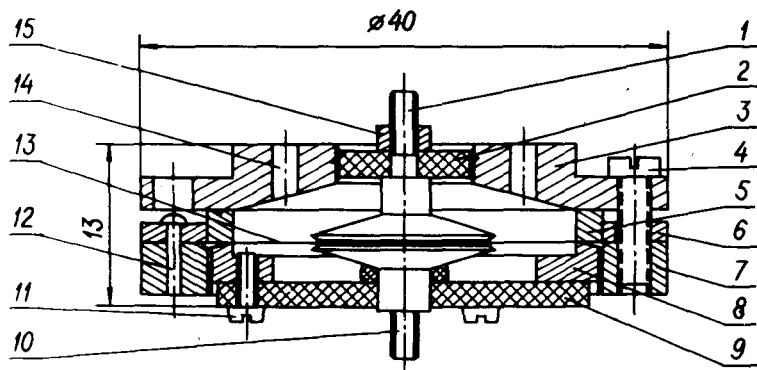


Рис. 1. Схематический разрез ДК-79 (без вакуумируемого корпуса).

Мембрана 13 из нержавеющей стали марки ЭП 352/353 толщиной 11 мкм зажата между двумя установочными кольцами 6 и 7 из нержавеющей стали и закреплена двенадцатью заклепками 12. На внутренней стороне кольца 7 закреплено на резьбе латунное

нажимное кольцо 8. При его заворачивании создается необходимое натяжение мембраны. К кольцу 8 при помощи трех винтов II крепится изоляционная пластинка 9 из стеклотекстолита, к которой эпоксидной смолой приклеена обкладка 10 конденсатора возбуждения. С другой стороны мембраны установлена обкладка I измерительного конденсатора, которая приклеплена к сапфировому изолятору 2 при помощи гайки 15. Сапфировый изолятор приклеен эпоксидной смолой в крышке 3. Между крышкой и мембраной расположено дистанционное кольцо 5. Сама крышка привинчена тремя винтами 4 к кольцам 6 и 7. В крышке имеется два отверстия 14 откачки воздуха.

Плоскопараллельность пластин I и 10 с мембраной 13 и заданная величина зазоров между ними достигается при сборке прибора.

Диаметр рабочей части мембраны 13 составляет 26 мм. Пластины I и 10 имеют одинаковый диаметр - 16 мм и расположены примерно на одинаковом расстоянии от мембраны -  $40 \pm 50$  мкм.

Поверхность пластины I и противостоящая ей поверхность мембраны 13 позолочены методом катодного распыления по технологии, применяемой при изготовлении динамических конденсаторов ДК-62 /2/.

ДК установлен в герметичном корпусе (на рисунке не показан), воздух из которого откачивается до давления  $(3 \pm 5)$  Па.

Измерение характеристик разработанного ДК проводилось при помощи электрометрического усилителя, для возбуждения его использовался внешний звуковой генератор типа ГЗ-18.

Интересующими характеристиками электростатического ДК являются графики зависимости коэффициента модуляции  $m$  от частоты возбуждения  $f_0$  или резонансные кривые. Следует отметить, что ширина их значительно меньше ширины соответствующих кривых ДК с электромагнитным возбуждением. При колебании разные материалы в разной мере рассеивают энергию, характеризующую добротностью материала, которая по определению обратно пропорциональна ширине резонансной кривой /3/. Ширина резонансных кривых в электростатическом ДК в основном определяется материалом, применяемым для изготовления мембраны, поэтому выбор материала для мембраны играет большую роль. Так, например, применение в разработанном ДК мембраны из стали позволило обеспечить добротность порядка  $10^3$ . На рис. 2 приведены резонансные кривые двух экземпляров разработанного ДК в зависимости от напряжения возбуждения и температуры, а на

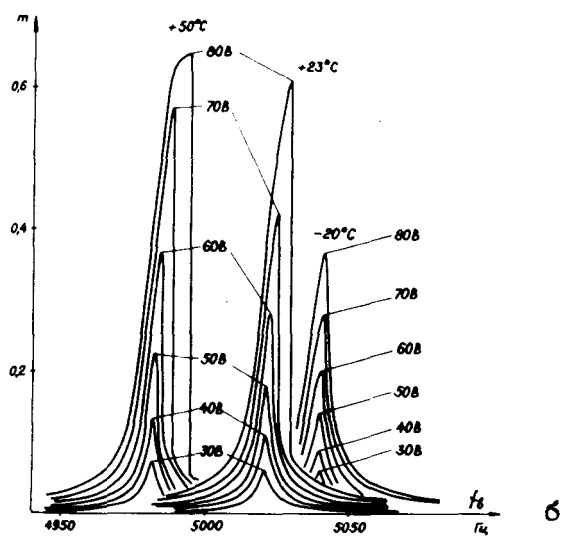
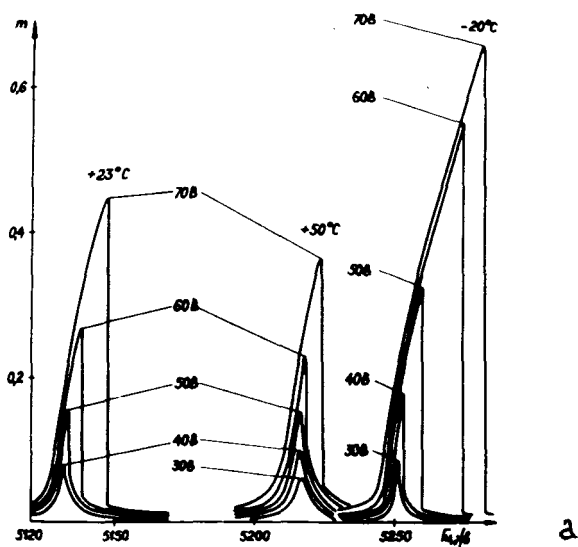
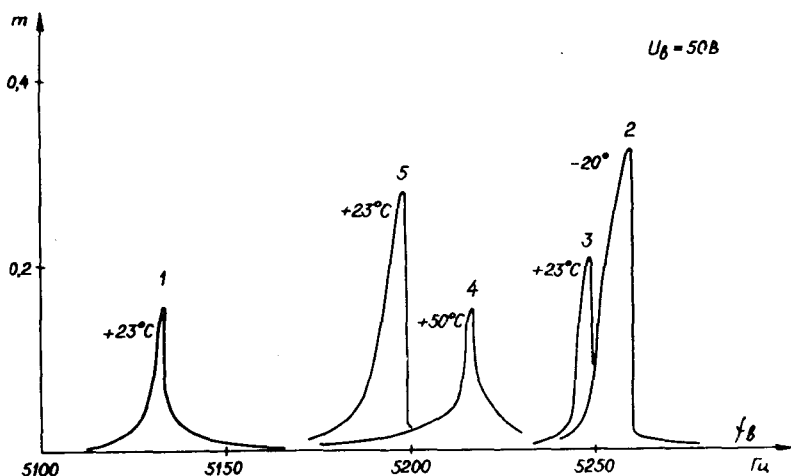
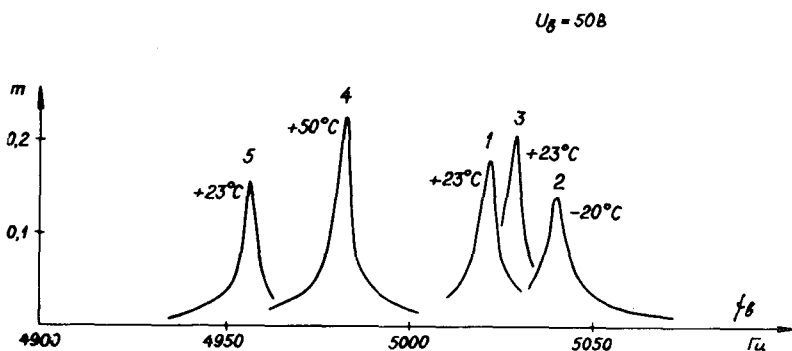


Рис. 2. Резонансные кривые двух экземпляров ДК-79 в зависимости от температуры и напряжения возбуждения: а - ДК-79 № 1; б - ДК-79 № 2.





а



б

Рис. 3. Резонансные кривые двух экземпляров ДК-79 при одном цикле температурных испытаний. Порядок измерения указан цифрами сверху: а - ДК-79 № I; б - ДК-79 № 2.

рис. 3 резонансные кривые тех же ДК при напряжении возбуждения  $U_b = 50$  В в течение одного цикла температурных испытаний. Из рис. 2 и 3 видно, что характер изменения резонансной частоты следующий: при нагревании она уменьшается и при охла-

дении — увеличивается. Это объясняется, по-видимому, тем, что натяжение мембраны зависит от температуры: при нагревании оно уменьшается и при охлаждении — увеличивается. Формула, связывающая натяжение с резонансной частотой мембраны, приведена в работе /4/.

Менее ясна сильная зависимость коэффициента модуляции от температуры: для ДК № 1 она около  $2,5\% \text{ K}^{-1}$  и для № 2 около  $0,8\% \text{ K}^{-1}$ . По испытаниям этих двух экземпляров ДК нельзя установить какой-либо закономерности зависимости коэффициента модуляции от температуры. Например, при понижении температуры коэффициент модуляции для ДК № 1 увеличивается, а для № 2 — уменьшается. Такая сильная температурная зависимость коэффициента модуляции не объясняется изменением статических значений измерительного конденсатора и конденсатора возбуждения — они очень слабо зависят от температуры ( $0,008\% \text{ K}^{-1}$ ). Это может быть связано со структурными изменениями в материале самой мембраны, о чем имеются сведения и в литературе, например в /3/. Из рис. 2 видно, что при значениях коэффициента модуляции 0,15 и выше форма резонансных кривых искажается. Для более подробного рассмотрения этого явления обратимся к рис. 4. Если постепенно увеличивать частоту, то коэффициент модуляции будет возрастать (участок ABC), в точке C его значение скачкообразно уменьшается (точка D). С дальнейшим увеличением частоты значение коэффициента модуляции постепенно уменьшается (участок DE). Если же снимать резонансную кривую начиная из точки E, постепенно понижая частоту, то значения коэффициента модуляции на участке EDF будут постепенно увеличиваться, причем участок ED совпадает с участком DE, снятым при увеличении частоты. В точке F происходит скачкообразное увеличение коэффициента модуляции (участок FB) и при дальнейшем понижении частоты (участок BA) кривая совпадает с кривой, снятой ранее, при увеличении частоты. Причина этого явления заключается в том, что при значениях коэффициента модуляции выше 0,15 начинает сказываться нелинейность колебаний мембраны. Действительная резонансная кривая проходит через точки ABCFDE. Участок CFD образует область неустойчивых состояний. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе /4/.

В результате испытания двух экземпляров ДК-79 в интерва-

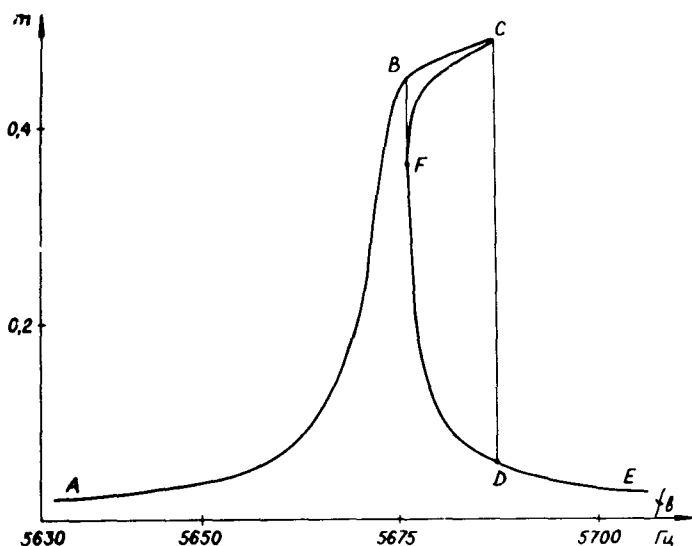


Рис. 4. Резонансная кривая одного экземпляра ДК-79 при напряжении возбуждения 40 В.

де температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  можно привести следующие основные технические данные:

- 1) сопротивление изоляции
  - между высокоомным вводом и корпусом более  $10^{16}$  Ом
  - между вводом подачи напряжения возбуждения и корпусом более  $10^{13}$  Ом
- 2) номинальные значения статических емкостей измерительного конденсатора и конденсатора возбуждения  $20 \pm 35$  пФ
- 3) частота модуляции около 5 кГц
- 4) номинальный коэффициент модуляции при напряжении возбуждения  $50 \pm 60$  В  $0,2 \pm 0,25$
- 5) временной дрейф контактной разности потенциалов за 12 часов не более 80 мкВ
- 6) дрейф контактной разности потенциалов при изменении температуры:
  - от комнатной до  $+50^{\circ}\text{C}$  не более  $15 \text{ мкВ} \cdot \text{K}^{-1}$
  - от комнатной до  $-20^{\circ}\text{C}$  не более  $40 \text{ мкВ} \cdot \text{K}^{-1}$

- 7) изменение резонансной частоты колебания мембраны при изменении температуры не более  $0,05\% \text{ K}^{-1}$
- 8) изменение коэффициента модуляции при изменении температуры не более  $2,5\% \text{ K}^{-1}$
- 9) изменение емкостей измерительного конденсатора и конденсатора возбуждения при изменении температуры не более  $0,01\% \text{ K}^{-1}$
- 10) потребляемая мощность возбуждения для обеспечения номинального коэффициента модуляции не более 40 мВ.А
- II) масса (ДК без вакуумируемого корпуса) 72 г

Испытания двух экземпляров разработанного ДК были, по существу, первыми температурными воздействиями на них, поэтому после температурных тренировочных циклов можно ожидать некоторого стабилизирования характеристик ДК.

Что касается изменения резонансной частоты и коэффициента модуляции при изменении температуры, то можно считать полученные результаты вполне удовлетворительными. В колебательных системах с узкой полосой пропускания, как в данном случае, возбуждение мембраны практически невозможно без применения в генераторе следящей обратной связи. Изменения коэффициента модуляции, имеющие место в разработанном ДК, существенной роли не играют, так как в современных электрометрических устройствах коэффициент передачи стабилизируется глубокой отрицательной обратной связью.

## Л и т е р а т у р а

1. Сакс О.Б., Хяммалов Ю.А. Исследование возможности использования пьезокерамической системы возбуждения в динамическом конденсаторе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 443, 1977, 139-152.
2. Сакс О.Б. Емкостной вибропреобразователь ДК-62 для электрометрических усилителей. - Измерительная техника, 3, 1966, 51-53.
3. Саренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев, изд. АН УССР, 1962.
4. Хяммалов Ю.А. Анализ работы электростатического динамического конденсатора с натянутой мембраной. В настоящем сборнике.

# THE ELECTROSTATICALLY DRIVEN DYNAMIC CAPACITOR DK-79

O. Saks, J. Hämmälöv and V. Shor

## S u m m a r y

The paper presents the description of the design of an electrostatically driven dynamic capacitor of the type DK-79. A thin taut steel membrane has been used as a vibrating electrode in the designed dynamic capacitor.

The main technical characteristics of DK-79 have been given and the dependence of its resonance characteristics has been plotted. It has been shown that at relatively high driving voltages the resonance characteristics of DK-79 are bent.

DK-79 can operate in the range of temperatures from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $+50^{\circ}\text{C}$  at modulation frequencies of about 5 kcps. At the same time the nominal modulation coefficient lies in the range from 0.2 to 0.25 and its maximum value reaches 0.6.

# КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРА В АЭРОИОННЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Х.Ф. Таммет

## Кусочно-линейная модель спектра

Ниже будут рассмотрены распределения или спектры плотности заряда, проводимости и концентрации аэрозольных частиц, причем аргументом распределения служит подвижность или размер частиц. По причине такого разнообразия используются общие обозначения для распределенной величины  $\varphi$  и для аргумента распределения  $x$ . Спектр описывается при помощи функции плотности распределения  $\varphi = \varphi(x)$ .

Для определения кусочно-линейной функции необходимо выбирать  $n + 2$  узлов аргумента спектра  $x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n+1}$ . Интервал между крайними узлами  $x_0$  и  $x_{n+1}$  должен полностью охватить тот интервал аргумента, в котором нельзя принимать априорное допущение  $\varphi(x) = 0$ . Это условие позволяет нам договориться, что

$$\varphi(x_0) = \varphi(x_{n+1}) = 0. \quad (I)$$

Определим  $n$  элементарных спектров  $\varphi^1(x)$ ,  $\varphi^2(x)$ , ...,  $\varphi^n(x)$  следующим образом

$$\varphi^i(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_{i-1} \\ (x - x_{i-1}) / (x_i - x_{i-1}) & \text{при } x_{i-1} \leq x \leq x_i \\ (x_{i+1} - x) / (x_{i+1} - x_i) & \text{при } x_i \leq x \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{при } x_{i+1} \leq x \end{cases} \quad (2)$$

Тогда произвольная кусочно-линейная функция, удовлетворяющая условию (I), разлагается по элементарным спектрам

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i \varphi^i(x), \quad (3)$$

причем множители  $\varphi_i$  равны значениям спектральной функции в узлах

$$\varphi_i = \varphi(x_i). \quad (4)$$

Описанная модель спектра иллюстрируется рисунком 1.

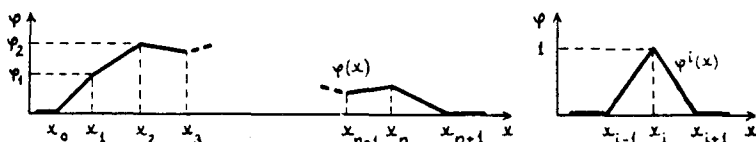


Рис. 1. Кусочно-линейный спектр и элементарный спектр.

Элементарные спектры (2) нормированы по амплитуде и не нормированы по интегралу. Интеграл через элементарный спектр будет

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^i(x) dx = (x_{i+1} - x_{i-1})/2. \quad (5)$$

В случае нормирования элементарных спектров по интегралу мы потеряли бы свойство (4).

Кусочно-линейная модель имеет следующее полезное в спектрометрии свойство:

значения спектральной функции всюду неотрицательны тогда и только тогда, когда все множители разложения (3) неотрицательны.

Это свойство обеспечит эквивалентность требований неотрицательности проявления непрерывного спектра  $\varphi(x)$  и конечно-мерного спектра  $\{\varphi_i\}$ . Волнистые скобки указывают, что рассматривается множество всех элементов  $\varphi_i$ . Определение и анализ задач проявления спектра можно найти в работе [1].

Кусочно-линейная функция может быть рассмотрена как сплайн единичного дефекта первой степени. Определение сплайнов можно найти, например, в книге [2]. Возможно ввести в рассмотрение сплайны произвольной степени  $\xi$  и построить для линейного разложения этих сплайнов всюду неотрицательные элементарные сплайны, каждый из которых отличается от нуля только в  $\xi + 1$  соседних межузловых интервалах. Однако среди сплайнов единичного дефекта свойство эквивалентности требований неотрицательности проявления непрерывного и конечно-мерного спектров свойственно только для кусочно-линейной функции.

## Уравнения спектрометра

Обозначим запись спектрометра в непрерывной модели  $P(k^*)$  и в конечномерной модели  $\{P_j\}$ . Рассмотрим в непрерывной модели спектр плотности заряда по подвижности  $q(k)$ , спектр проводимости по подвижности  $\lambda(k) = k q(k)$ , спектр численной концентрации частиц по размеру  $f(r)$  и спектр  $g(r) = r^3 f(r)$ , который в случае одинаковой плотности всех частиц пропорционален весовому спектру аэрозоля по размеру. Значения спектра  $g$  относительно однородны в большом диапазоне размеров. В вычислительной практике это преимущество перед спектром  $f$ , который обладает большими значениями в области малых и малыми значениями в области больших размеров. В конечномерной модели будут рассмотрены те же распределения, но спектры здесь описываются конечными наборами чисел  $\{q_i\}$ ,  $\{\lambda_i\}$ ,  $\{f_i\}$  и  $\{g_i\}$ .

Для нас представляют интерес три уравнения для непрерывной и два уравнения для конечномерной модели:

$$P(k^*) = \int G^q(k^*, k) q(k) dk, \quad (6)$$

$$P(k^*) = \int G^\lambda(k^*, k) \lambda(k) dk, \quad (7)$$

$$P(k^*) = \int H(k^*, r) g(r) dr, \quad (8)$$

$$P_j = \sum_i G_{ji}^\lambda \lambda_i, \quad (9)$$

$$P_j = \sum_i H_{ji} g_i. \quad (10)$$

Назовем  $G^q(k^*, k)$  аппаратной функцией для плотности заряда,  $G^\lambda(k^*, k)$  аппаратной функцией для проводимости,  $H(k^*, r)$  аппаратной функцией гранулометра,  $\{G_{ji}^\lambda\}$  аппаратной матрицей для проводимости и  $\{H_{ji}\}$  аппаратной матрицей гранулометра.

Уравнения (6-8) используются только в теоретических рассуждениях. Практические измерения можно строго описать только при помощи конечномерных уравнений (9-10). Обоснование этого утверждения можно найти в работе /1/.

## Аппаратная функция для проводимости

Каждый спектрометр имеет свою аппаратную функцию, зависящую от устройства измерительного конденсатора спектрометра. Типовые устройства измерительного конденсатора описаны в



работе /3/. Рассмотрим ниже дифференциальный измерительный конденсатор первого порядка, собирающая обкладка которого разделена на изолированные кольца. Такой измерительный конденсатор используется в многоканальных спектрометрах. Пронумеруем кольца собирающей обкладки  $m$ -канального спектрометра начиная с заднего кольца индексом  $j = 1, 2, \dots, m$ . Обозначим предельную подвижность для задней кромки  $j$ -того кольца через  $k_j^*$ . Предельная подвижность для передней кромки будет при этом  $k_{j+1}^*$ . Выражение аппаратной функции дифференциального измерительного конденсатора для плотности заряда можно найти в /3/. Очевидно,  $G^1(k_j^*, k) = G^2(k_j^*, k) / k$ . Если запись определяется как отношение силы тока аэроионов через кольцо к расходу воздуха, то

$$G^1(k_j^*, k) = \begin{cases} \frac{\delta_j}{k_j^*} & \text{при } 0 \leq k \leq k_j^* \\ \frac{1}{k} - \frac{1}{k_{j+1}^*} & \text{при } k_j^* \leq k \leq k_{j+1}^* \\ 0 & \text{при } k_{j+1}^* \leq k \end{cases} \quad (II)$$

Здесь принято обозначение

$$\delta_j = 1 - \frac{k_j^*}{k_{j+1}^*} \quad (12)$$

График зависимости  $G^1$  от  $k$  состоит из горизонтальной прямой для подвижностей от 0 до  $k_j^*$  и падающей гиперболы для подвижностей от  $k_j^*$  до  $k_{j+1}^*$ .

#### Модель спектра по подвижности

В спектрометрии подвижностей можно использовать кусочно-линейное приближение или для спектра плотности заряда или для спектра проводимости. Спектр проводимости имеет здесь определенные преимущества перед спектром плотности заряда:

- значения функции  $\varrho(k)$  в области тяжелых аэроионов, как правило, на несколько порядков величины превышают значения той же функции в области легких аэроионов, а значения функции  $\lambda(k)$  в широком диапазоне подвижности более менее равномерны,

- в пределе  $k \rightarrow 0$  всегда  $\lambda(k) \rightarrow 0$ , а функция  $\varrho(k)$  не допускает приближения прямой, пересекающей начало координатных осей. Поэтому целесообразно приближать кусочно-линейной

функцией спектр проводимости, причем нулевым узлом можно выбирать подвижность 0.

Рассмотрим интервал подвижностей между двумя соседними узлами. Согласно кусочно-линейной модели спектра проводимости внутри этого интервала

$$\lambda(k) = \frac{1}{k_{i+1} - k_i} \left[ (k_{i+1} - k) \lambda_i + (k - k_i) \lambda_{i+1} \right]. \quad (I3)$$

Для обеспечения возможности перехода от кусочно-линейной модели спектра к фракционной модели спектра вычислим частную проводимость фракции:

$$\lambda(k_i, k_{i+1}) = \int_{k_i}^{k_{i+1}} \lambda(k) dk = \frac{1}{2} (k_{i+1} - k_i) (\lambda_i + \lambda_{i+1}). \quad (I4)$$

Частная плотность заряда фракции будет

$$g(k_i, k_{i+1}) = \int_{k_i}^{k_{i+1}} g(k) dk = \left( \frac{k_{i+1}}{k_{i+1} - k_i} \ln \frac{k_{i+1}}{k_i} - 1 \right) \lambda_i + \left( 1 - \frac{k_i}{k_{i+1} - k_i} \ln \frac{k_{i+1}}{k_i} \right) \lambda_{i+1} \quad (I5)$$

Последняя формула может представить определенный практический интерес, поскольку фракционная модель спектра плотности заряда является наиболее простой и популярной моделью распределения аэроионов по подвижности.

#### Аппаратная матрица для проводимости

Рассмотрим  $m$ -канальный спектрометр с аппаратной функцией (II), который имеет набор  $m+1$  предельных подвижностей  $k_1^* < k_2^* < \dots < k_{m+1}^*$  и выдает в качестве записи  $m$  канальных сигналов  $P(k_1^*), P(k_2^*), \dots, P(k_m^*)$ . Элементами аппаратной матрицы для проводимости будут канальные сигналы, соответствующие элементарным спектрам

$$G_{ji}^\lambda = \int G^\lambda(k_j^*, k) \lambda^i(k) dk. \quad (I6)$$

Назовем модель спектра вполне согласованной со спектрометром при условии, что узлами кусочно-линейной модели спектра выбраны предельные подвижности

$$k_i = k_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, n+1. \quad (I7)$$

При вычислении элементов аппаратной матрицы для вполне согласованной модели спектра встречаются четыре частных случая:

1.  $i \leq j-1$ . Тогда элементарный спектр полностью расположен в области постоянных значений аппаратной функции  $G^\lambda$  и

$$G_{ji}^\lambda = \frac{\delta_j}{k_j} \frac{k_{i+1} - k_{i-1}}{2} . \quad (18)$$

2.  $i = j$ . Тогда левое крыло элементарного спектра расположено в области постоянных значений аппаратной функции, а правое крыло совпадает с гиперболической ветвью аппаратной функции. Интегрирование дает результат

$$G_{jj}^\lambda = \frac{1}{\delta_j} \ln \frac{1}{1-\delta_j} - \frac{\delta_j(1-\delta_j-1)}{2} - 1 . \quad (19)$$

3.  $i = j+1$ . Левое крыло элементарного спектра попадает на гиперболическую ветвь, а правое крыло вообще не дает сигнала. Тогда

$$G_{ji}^\lambda = 1 - \frac{\delta_j}{2} - \frac{1-\delta_j}{\delta_j} \ln \frac{1}{1-\delta_j} . \quad (20)$$

4.  $i \geq j+2$ . Элементарный спектр не перекрывается с областью ненулевых значений аппаратной функции

$$G_{ji}^\lambda = 0 . \quad (21)$$

По формулам (17-21) можно вычислить все элементы аппаратной матрицы.

#### Модель спектра по размеру

При рассмотрении спектра по подвижности первым кусочно-линейным элементарным спектром удается охватить все грубые частицы до  $k = 0$ . Попытка кусочно-линейного приближения непосредственно функции  $f(r)$  не увенчается таким успехом. Здесь приходится искать некоторое преобразование координат, которое придало бы спектральным кривым желаемые свойства.

Согласно Юнге /4/ грубая фракция атмосферного аэрозоля ( $r > 0,1$  мкм) подчиняется закону  $f(r) \sim 1/r^2$ . Поэтому целесообразно использовать следующее преобразование

$$\left. \begin{aligned} x &= 1/r \\ \varphi(x) &= g(r) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Согласно закону Кнге при  $x \rightarrow 0$  наблюдается  $\varphi(x) \sim x$ , что и необходимо для того, чтобы получить возможность выбрать крайним узлом  $x = 0$  при соблюдении условия (I).

Примем для элементарного спектра в шкале  $x$  выражение (2). Тогда элементарный спектр в шкале размеров будет следующий:

$$g^i(r) = \begin{cases} 0 & \text{при } r_{i-1} \leq r \\ r_i(r_{i-1}/r - 1) / (r_{i-1} - r_i) & \text{при } r_i \leq r \leq r_{i-1} \\ r_i(1 - r_{i+1}/r) / (r_i - r_{i+1}) & \text{при } r_{i+1} \leq r \\ 0 & \text{при } r \leq r_{i+1} \end{cases} \quad (23)$$

Здесь мы сохранили возрастающую по  $x$  и убывающую по  $r$  последовательность узлов. Это упрощает сравнение спектра по размеру со спектром по подвижности.

Рассмотрим теперь интервал размеров между двумя соседними узлами  $r_{i+1}$  и  $r_i$  в которых функция  $\varphi(x)$  принимает значения  $\varphi_{i+1}$  и  $\varphi_i$ , а функция  $g(r)$  — значения  $g_{i+1}$  и  $g_i$ . Согласно принятой модели внутри интервала

$$\varphi(x) = \left[ (x_{i+1} - x)\varphi_i + (x - x_i)\varphi_{i+1} \right] / (x_{i+1} - x_i), \quad (24)$$

откуда

$$g(r) = \frac{r_i r_{i+1}}{r_i - r_{i+1}} \left[ \left( \frac{1}{r_{i+1}} - \frac{1}{r} \right) g_i + \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_i} \right) g_{i+1} \right]. \quad (25)$$

Путем интегрирования выражения  $r^{-3}g(r)$  легко вычислить фракционную числовую концентрацию частиц

$$n(r_{i+1}, r_i) = \frac{r_i - r_{i+1}}{6 r_i^2 r_{i+1}^2} \left[ (r_i + 2r_{i+1})g_i + (2r_i + r_{i+1})g_{i+1} \right]. \quad (26)$$

Эта формула связывает наиболее известную в аэрозольной спектрометрии фракционную модель числовой концентрации с кусочно-линейной моделью функции  $g(1/r)$ .

В частном случае

$$n(r_1, \infty) = \frac{g_1}{3r_1^2} = \frac{1}{3} r_1 f_1. \quad (27)$$

Столь простое соотношение является следствием априорного допущения закона Юнге.

#### Аппаратная матрица гранулометра

Аппаратная матрица гранулометра вычисляется по методике, предложенной в работе /5/. Принимаем за конечномерное описание спектра аэрозоля по размеру множители разложения  $g(r) = \sum_i g_i g^i(r)$ , где элементарные спектры определяются соотношениями (22) и (2). Обозначим через  $g_n^i(k)$  частный спектр плотности заряда по подвижности для частиц, спектр размеров которых является  $i$ -тым элементарным спектром и которые несут каждый ровно по  $n$  элементарных зарядов. Элементами аппаратной матрицы будут каналные сигналы спектрометра, соответствующие элементарным спектрам. При вычислении необходимо сложить сигналы для частиц со всеми возможными кратностями заряда:

$$H_{ji} = \int \sum_n G^s(k_j^*, k) g_n^i(k) dk. \quad (28)$$

Частный спектр плотности заряда по подвижности можно вычислить, если известна вероятность  $p_n(r)$  события, что частица с размером  $r$  носит ровно  $n$  элементарных зарядов. Тогда

$$g_n^i(k) dk = n e p_n(r) f^i(r) dr, \quad (29)$$

где  $e$  обозначает элементарный заряд. Поскольку  $f^i(r) = g^i(r)/r^3$ , то получим следующую формулу для вычисления элементов аппаратной матрицы

$$H_{ji} = e \int \left[ \sum_n n p_n(r) G^s(k_j^*, k_n(r)) \right] \frac{g^i(r)}{r^3} dr, \quad (30)$$

где  $k_n(r)$  обозначает подвижность частицы с размером  $r$  и зарядом  $ne$ . Выражения функций  $p_n(r)$  и  $k_n(r)$  сложны и поэтому формулу (30) не удастся упростить. Расчет элементов аппаратной матрицы гранулометра завершается только путем численного интегрирования.

## Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии. Таллин, 1975, 100 с.
2. Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н. Сплаины в вычислительной математике. М., 1976, 248 с.
3. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1967, вып. 195, 234 с. .
4. Юнге А. Химический состав и радиоактивность атмосферы, М., 1965, 424 с.
5. Таммет Х.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с.30-34.

### A PIECEWISE LINEAR MODEL OF THE SPECTRUM FOR THE MEASUREMENT OF AIR IONS AND AEROSOLS

H. Tammet

#### S u m m a r y

When the whole spectral region for which one cannot assume  $\varphi(x) = 0$  remains between the extreme knots of the piecewise linear model, one can use assumption (1). This allows one to consider the piecewise linear function as a linear combination (3) of elementary spectra (2). The use of a piecewise linear approximation is described with equations (6-10) for spectrometers. An expression (11) of the apparatus function of the conductivity spectrometer is derived as an auxiliary formula. The conductivity spectrum suits a piecewise linear approximation better than the spectrum of charge density. The piecewise linear model of the conductivity spectrum makes it possible in case of need to calculate charge-density fractions (15) easily. Specific formulae (16 - 21) are derived for the calculation of the apparatus function of the conductivity spectrometer. In aerosol granulometry the function  $g(r) = r^3 f(r)$  is suitable for a piecewise linear approximation where  $f(r)$  is the spectrum of a numerical concentration. In the case of the Junge distribution [4]  $g$  is proportional to the inverse

value of the radius, which is chosen for the argument of a piecewise linear image (22). The elementary spectrum expresses itself in the size scale in the form of (23). Numerical concentrations of fractions (26) can also be easily calculated by means of the constructed model. The apparatus matrix of the granulometer is derived on the principle set forth in paper [5]; however, it must be pointed out that it is not possible to avoid numerical integration when matrix elements (30) will be calculated.

# К ТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГРАУЛОМЕТРИИ АЭРОСОЛЕЙ

Х.Ф. Таммет

## Обозначения и единицы измерения

Все уравнения в настоящей статье написаны в системе СИ. Наряду с единицами СИ используются также практические единицы измерения, кратные единицам СИ. Ниже за названием физической величины указывается выражение практической единицы измерения через единицу СИ или единица измерения СИ.

$d$  - диаметр частицы,  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ , ( $d_c$  - критический диаметр,  $d_D$  - характерный диффузионный диаметр,  $d_E$  - характерный ударный диаметр),

$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - элементарный заряд,

$h$  - толщина слоя зарядки,  $1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$ ,

$k$  - подвижность аэроиона,  $1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) = 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,

$k_{st} = 1,5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  - условная стандартная подвижность легких аэроионов,

$n$  - концентрация легких аэроионов,  $1 \text{ см}^{-3} = 10^6 \text{ м}^{-3}$ ,

$r$  - радиус частицы,  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ,

$t$  - время, с, ( $t_q$  - время зарядки частиц),

$q$  - заряд частицы, Кл,

$A$  - безразмерный коэффициент релаксации диффузионной зарядки,

$C$  - электрическая емкость, Ф,

$E$  - напряженность электрического поля,  $1 \text{ В/см} = 100 \text{ В/м}$ , ( $E_0$  - характерная напряженность ударной зарядки),

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  - постоянная Больцмана,

$R$  - электрическое сопротивление, Ом,

$T$  - температура, К,

$U$  - электрическое напряжение, В,

$\alpha$  - безразмерный коэффициент интенсивности зарядки,

$\beta$  - коэффициент, связанный с неоднородностью зарядки,  $1 \text{ см/с} = 10^{-2} \text{ м/с}$ ,

$\chi = q/e$  - безразмерный заряд частицы,

$\psi$  - безразмерный коэффициент неоднородности степени зарядки,

$\varepsilon$  - безразмерная относительная электрическая проницаемость аэрозольных частиц,



- $\epsilon_0 = 8,86 \text{ пФ/м} = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - абсолютная электрическая проницаемость воздуха,  
 $\tau = RC$  - постоянная времени, с,  
 $\omega$  - безразмерный электростатический коэффициент,  
 $\theta$  - безразмерный коэффициент неоднородности процесса зарядки,  
 $\Phi$  - расход воздуха  $l \text{ см}^3/\text{с} = 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

## Введение

Метод электрической гранулометрии аэрозолей доказал свою перспективность в практике. Наибольшие заслуги в этом имеет лаборатория аэрозольной технологии университета Миннесота /1/. Несмотря на практический успех, признается, что техника электрической гранулометрии находится лишь в начальной стадии своего развития и далека от совершенства.

Процесс электрической гранулометрии можно разделить на три стадии:

- зарядка аэрозольных частиц,
- сепарация и регистрация частиц,
- вычисление спектра частиц по размеру.

Все три стадии равно ответственны за правильность результатов и эффективность метода измерения. В каждой стадии можно использовать разные частные методы. Поэтому техника процесса как целого допускает много модификаций.

В настоящей статье рассматриваются только две первые стадии процесса электрической гранулометрии. Некоторые соображения автора о третьей стадии высказаны в статье /2/. Из множества возможных частных методов будут рассмотрены только униполярная зарядка частиц в потоке легких аэроионов и регистрация частиц по электрическому току в том же измерительном конденсаторе, где происходит сепарация частиц. В статье не ставится задача усовершенствования самой теории зарядки частиц. Основное внимание обращено именно к технике гранулометрии и при рассмотрении математической модели зарядки частиц имеется в виду только узкая цель выявления зависимости свойств гранулометра от устройства и параметров зарядника. При этом считается возможным ограничиваться довольно грубой математической моделью, предложенной Мирзабеяном /3/, и от-

казаться от учета новейших уточнений в теории зарядки частиц. Предполагается, что частицы сферические. Оценивается только средний заряд частиц и не учитывается статистический разброс зарядов. Это не означает, что столь упрощенная математическая модель признается достаточной и в стадии вычисления спектра частиц по размеру. Здесь, по-видимому, нельзя полностью доверять ни одной известной теории зарядки частиц. Лучше описать зарядку частиц некоторой полуэмпирической формулой, которая учитывает также статистический разброс и потерю заряженных частиц в заряднике. Полуэмпирическая формула содержит теоретически неопределенные постоянные, которые должны быть определены только путем калибровки гранулометра по тест-аэрозолям, имеющим известные распределения частиц по размеру.

#### Математические модели зарядки частиц

##### Параметр зарядки

Традиционным параметром диффузионной зарядки аэрозольных частиц является произведение концентрации легких аэроионов на время зарядки. Это заставляет предполагать, что легкие аэроионы имеют фиксированную подвижность. В противном случае интенсивность зарядки пропорциональна также средней подвижности аэроионов. Иногда надо учитывать еще изменение концентрации легких аэроионов во времени. Учитывая вы сказанное, получим вместо традиционного произведения  $nt_q$  параметр зарядки

$$\alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{t_q} \lambda dt, \quad (1)$$

где  $\lambda = ekn$  — проводимость, обусловленная легкими аэроионами, а электрическая проницаемость воздуха введена для того, чтобы получить безразмерную величину.

Для аэроионов с условной стандартной подвижностью  $1,5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и постоянной во времени концентрацией имеем

$$\alpha = 2,71 \frac{nt_q}{10^6 \text{ см}^{-3} \text{ с}} \quad (2)$$

### Электростатическое рассеивание аэроионов

Рассмотрим воздух, содержащий монобипольные легкие аэроионы только одной полярности, и будем следить за точкой, которая движется по траектории аэроиона. В такой точке плотность объемного заряда уменьшается по закону электростатического рассеивания

$$\frac{d\rho}{dt} = - \frac{k\rho^2}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

которое действительно также во внешнем электростатическом поле и в движущемся воздухе [4]. Общее решение уравнения можно записать в виде

$$\lambda = \frac{\epsilon_0}{t - t_0}, \quad (4)$$

где момент  $t_0$  определяется начальными условиями.

Договоримся в дальнейшем везде учитывать время соответственно к конкретным условиям с момента  $t_0$ . Тогда  $t_0 = 0$  и

$$\lambda = \frac{\epsilon_0}{t}. \quad (5)$$

При  $t \rightarrow 0$  имеем  $\lambda \rightarrow \infty$ . В реальных условиях можно допустить  $t = 0$ , например, в начале траектории аэроиона на острие коронного разрядника. Время, отсчитываемое с момента  $t_0$ , называется ниже условным возрастом легких аэроионов.

Для легких аэроионов стандартной подвижности имеем при  $t = 1$  с  $n = 369000 \text{ см}^{-3}$ .

### Идеальный трансверсальный зарядник

Устройство зарядника объясняет рис. 1.

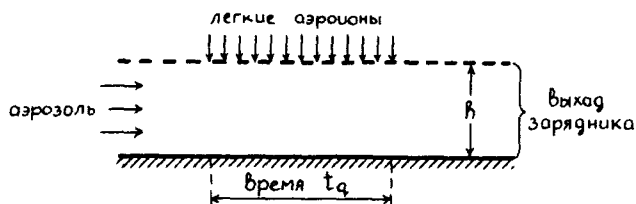


Рис. 1. Продольный разрез идеального трансверсального зарядника.

Воздух равномерно протекает через зарядник слева направо. Как выход зарядника используется некоторый слой воздуха с ограниченной толщиной  $h$ . Легкие аэроионы под действием внешнего электрического поля движутся приблизительно поперечно к потоку воздуха. Зона зарядки длинная по сравнению с размером  $h$ , время протекания воздуха через эту зону равно  $t_q$ . Из-за электростатического рассеивания проводимость больше в слоях, близких к источнику аэроионов, и меньше у нижней граничной поверхности зарядника. Обозначим значения параметра  $\alpha$  на верхней и нижней границах зоны зарядки через  $\alpha_{max}$  и  $\alpha_{min}$ . Неоднородность процесса зарядки можно описать параметром

$$\theta = \frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{\bar{\alpha}}, \quad (6)$$

где

$$\bar{\alpha} = \sqrt{\alpha_{max} \alpha_{min}} \quad (7)$$

среднее значение параметра зарядки  $\alpha$ .

#### Электрическое поле в трансверсальном заряднике

Конкретная аэрозольная частица проходит через зарядник на некоторой определенной высоте, где проводимость имеет некоторое определенное значение. При этом  $\alpha = \lambda t_q / \epsilon_0$  и согласно (5) имеем

$$\alpha = \frac{t_q}{t}, \quad (8)$$

где  $t$  - условный возраст аэроионов на рассматриваемой высоте. Используя (8), легко найти, что

$$\theta = \frac{\Delta t}{\bar{t}}, \quad (9)$$

где  $\Delta t = t_{max} - t_{min}$  - время пролета легких аэроионов через зону зарядки и  $\bar{t} = \sqrt{t_{max} t_{min}}$  - средний возраст легких аэроионов в зоне зарядки. Определим теперь среднюю напряженность электрического поля в зоне зарядки так, что

$$\frac{h}{\Delta t} = \bar{E} k. \quad (10)$$

Теперь можно вывести основное соотношение

$$\bar{E} = \frac{h}{\theta t_q} \frac{\alpha}{k}. \quad (11)$$

Из полученного результата вытекает, что средняя напряженность электрического поля в трансверсальном заряднике снизу ограничена допустимой неоднородностью процесса зарядки.

### Параметр зарядника $\beta$

Если фиксировать параметр  $\alpha$  и подвижность  $k$ , то, согласно формуле (11), напряженность поля в заряднике зависит от устройства зарядника только через множитель  $h/\theta t_q$ . Этот множитель обозначается  $\beta$ :

$$\beta = \frac{h}{\theta t_q} \quad (12)$$

и рассматривается как второй основной параметр зарядника. Параметр  $\beta$  имеет размерность скорости. Он пропорционален средней скорости легких аэроионов в заряднике.

$$\beta = \frac{1}{\alpha} \bar{E} k. \quad (13)$$

Чем больше параметр  $\beta$ , тем сильнее сказывается в заряднике механизм ударной зарядки аэрозольных частиц в электрическом поле.

### Пример

Пусть идеальный трансверсальный зарядник характеризуется следующими данными:

$n = 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ ,  $k = k_{st}$ ,  $t_q = 1 \text{ с}$ ,  $h = 1 \text{ см}$ ,  $\theta = 20\%$ . Эти данные однозначно предписывают напряженность электрического поля в заряднике. По вышеприведенным формулам найдем

$$\alpha = 8,14, \quad \beta = 5 \text{ см/с}, \quad \bar{E} = 27 \text{ В/см}.$$

Если уменьшить напряженность, то соответственно будет расти параметр неоднородности  $\theta$ .

### Неоднородность зарядки в реальном трансверсальном заряднике

Как правило, параметры реального устройства хуже пара-

метров идеального устройства. В случае трансверсального зарядника встречаются исключения от высказанного правила.

В идеальном трансверсальном заряднике предполагается однородный профиль течения воздуха. Если воздух входит в реальный зарядник через длинный канал, то профиль будет близким к параболическому. Тогда время  $t_q$  больше в нижних и меньше в верхних слоях воздуха в заряднике. Это компенсирует неоднородность проводимости и уменьшает значение параметра  $\theta$  по сравнению с идеальным зарядником. Эффект может быть весьма существенным. В приборах с относительно коротким входным каналом профиль скоростей течения воздуха останется близким к однородному и вышеописанный эффект мало сказывается.

В относительно коротком заряднике наблюдается явление продольного расширения потока аэроионов сверху вниз. Это также компенсирует неоднородность проводимости.

Возможны и такие отступления от идеальности, которые ухудшают параметры зарядника. Наибольшую опасность представляет пространственная неоднородность источника легких аэроионов. Однако при хорошей конструкции вполне возможно достичь того, что неоднородность зарядки будет меньше рассчитанной по теории идеального трансверсального зарядника.

#### Модель Мирзабекяна

Мирзабекян /3/ показал, что заряд частицы  $q_D$ , приобретенный за счет диффузионного механизма, и заряд частицы  $q_E$ , приобретенный за счет ударного механизма зарядки, в первом приближении просто складываются и средний заряд частицы будет

$$\bar{q} = q_D + q_E. \quad (I4)$$

Для вычисления слагаемой  $q_D$  Мирзабекян предлагает уравнение

$$\frac{\epsilon_0}{ek} \left[ \text{Ei} \left( \frac{q_D e}{4\pi\epsilon_0 r K T} \right) - \ln \left( \frac{q_D e}{4\pi\epsilon_0 r K T} \right) - 0,5772 \right] = n t q, \quad (I5)$$

а для вычисления слагаемой  $q_E$  формулу Потенье

$$q_E = 4\pi\epsilon_0 \left( 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) E r^2 \frac{\pi k e n t q}{4\pi\epsilon_0 + \pi k e n t q}. \quad (I6)$$

Ниже модель Мирзабекяна будет приведена в легче обозримый

вид. Для этого предварительного приходится определить некоторые вспомогательные величины.

### Коэффициент релаксации и электростатический коэффициент

Уравнению (15) можно придать следующий вид:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{A^m}{m \cdot m!} = \alpha. \quad (17)$$

Встречающаяся здесь величина

$$A = \frac{q_0 e}{4\pi\epsilon_0 r K T} \quad (18)$$

рассматривается как безразмерный коэффициент релаксации диффузионной зарядки.

В промежутке  $\alpha = 3 \dots 300$  с ошибкой не более 0,1 действительна приближенная формула

$$A \approx \ln(1 + \alpha^{4/3}). \quad (19)$$

Для краткости записи формулы Потенье примем специальное обозначение для электростатического коэффициента

$$\omega = \frac{1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}. \quad (20)$$

Значения этого коэффициента не выходят из интервала  $1 \pm 0,5$ . В примерах рассмотрим как стандартное значение  $\omega = 1$ , что соответствует проницаемости  $\epsilon = 4$ .

### Характерные размеры и напряженность

Определим характерный диаметр диффузионной зарядки

$$d_D = \frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 K T}, \quad (21)$$

характерный диаметр ударной зарядки

$$d_E = \sqrt{\frac{k}{\omega \beta}} \frac{e}{2\pi\epsilon_0} = \sqrt{\frac{\bar{\alpha}}{\omega E}} \frac{e}{2\pi\epsilon_0} \quad (22)$$

и характерную напряженность электрического поля

$$E_0 = K T / d_D e. \quad (23)$$

При температуре 18°C имеем:

$$d_p = 115 \text{ нм}, \quad E_0 = 2185 \text{ В/см.}$$

Если допустить еще  $k = k_{st}$  и  $\omega = 1$ , то

$$d_E = \frac{6570 \text{ нм}}{\sqrt{\beta \cdot \frac{\text{см}}{c}}}.$$

### Уравнение зарядки частиц

Введенные выше характерные величины позволяют описывать модель Мирзабекяна хорошо обозримым уравнением

$$\bar{\gamma} = \frac{\bar{q}}{e} = A \frac{d}{d_p} + \frac{\alpha}{1 + 4/\alpha} \left( \frac{d}{d_E} \right)^2 \quad (24)$$

или равносильным уравнением

$$\bar{\gamma} = A \frac{d}{d_p} + \frac{\omega}{1 + 4/\alpha} \frac{E}{E_0} \left( \frac{d}{d_p} \right)^2. \quad (25)$$

В случае мелких частиц получим  $\bar{\gamma} < 1$ , что свидетельствует о том, что многие частицы незаряжены. Электрическая подвижность частиц не зависит от среднего заряда всех частиц  $\bar{\gamma}$ , а от среднего заряда заряженных частиц  $\gamma$ . Очевидно,  $\gamma$  никогда не меньше единицы. Для получения первого приближения можно предложить уравнение

$$\gamma \approx \sqrt{1 + \bar{\gamma}^2}. \quad (26)$$

### Электрическая подвижность частиц

При описании движения сферических частиц известная формула Милликаена признается достаточно точным во всем диапазоне интересующих нас размеров. Обозначим через  $d'$  численное значение диаметра по нанометрам, тогда формула Милликаена приводится к виду:

$$k = \gamma (9,44/d') \left[ 1 + (165/d') (1 + 0,336 \exp(-d'/153)) \right] \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}. \quad (27)$$

Здесь допущено, что температура равна 18°C и давление воздуха 1000 мб.

Зависимость подвижности частиц от размера иллюстрирует рис. 2. Четыре верхние кривые соответствуют четырем типич-



ным комбинациям параметров зарядника  $\alpha$  и  $\beta$ . Пятая кривая получает объяснение только во второй части настоящей статьи.

### Критический диаметр частиц

Назовем критическим диаметром такой диаметр, при котором подвижность частицы достигает минимума. Обычно критический диаметр порядка микрометра. При микрометровых частицах можно пренебречь экспоненциальным членом формулы Милликена и принять  $\gamma = \bar{\gamma}$ . Допустим еще, что подвижность легких аэроионов равна  $k_{st}$  и  $\omega = 1$ . Тогда

$$k \sim \left( \frac{A}{115} + \frac{\alpha\beta : \frac{cm}{c}}{(1+4/\alpha) 6570^2} d' \right) \left( 1 + \frac{165}{d'} \right). \quad (28)$$

Это выражение достигает минимума при диаметре

$$d_c = \sqrt{\frac{(1+4/\alpha) \ln(1+\alpha^{4/3})}{\alpha\beta : \frac{cm}{c}}} \cdot 7870 \text{ нм}. \quad (29)$$

Некоторые значения критического диаметра приведены в ниже-следующей таблице.

Т а б л и ц а I

Критический диаметр в нанометрах при разных значениях параметров  $\alpha$  и  $\beta$  (см/с) по формуле (29)

$\alpha \backslash \beta$	1	3	10	30
10	5200	3000	1640	950
30	3260	1880	1030	600
100	1990	1150	630	360
300	1260	730	400	230

Около критического диаметра гранулометр теряет способность разрешать частицы по размеру. При больших значениях  $d_c$  будем говорить о режиме преимущественно диффузионной зарядки, при малых значениях — о режиме преимущественно ударной зарядки.

### Критерий качества средней зарядки

Тамм /5/ предложил следующий критерий качества аналитической зарядки частиц

$$\xi = \frac{r}{\sigma_r}, \quad (30)$$

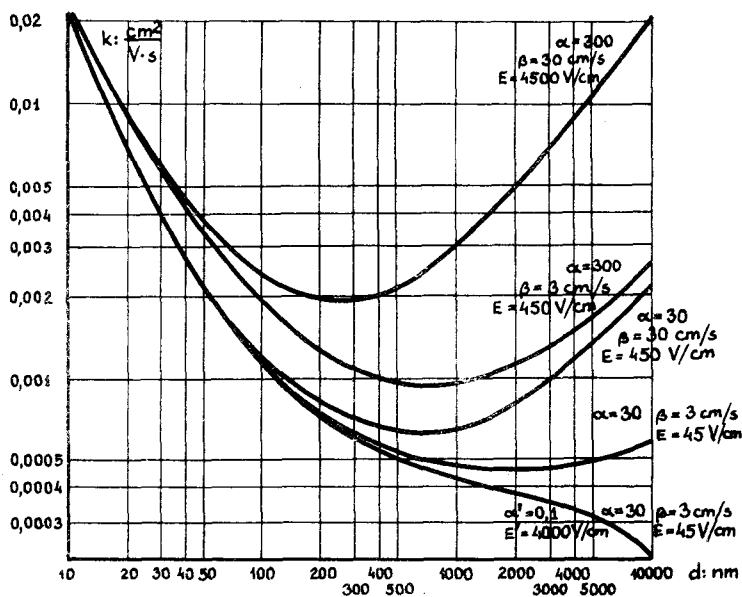


Рис. 2. Зависимость подвижности от диаметра частиц и параметров зарядника.

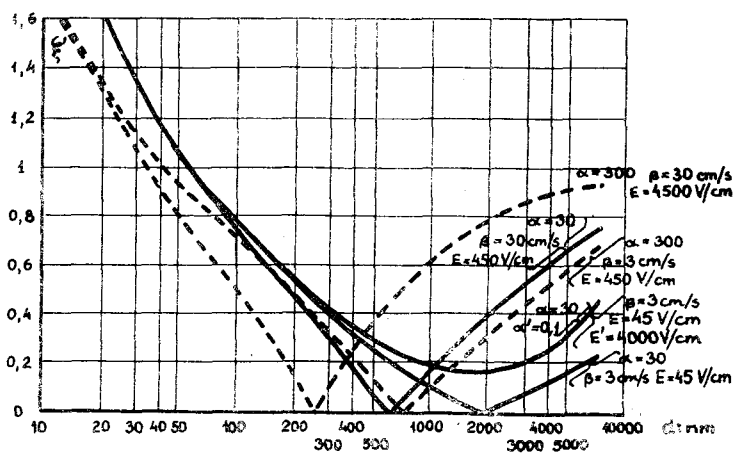


Рис. 3. Зависимость критерия качества средней зарядки от диаметра частиц и параметров зарядника.

где  $\sigma_r$  - стандартное отклонение радиусов при фиксированной подвижности. Критерий  $\xi$  зависит от коэффициента вариации подвижностей частиц одного и того же размера и от закона средней зарядки. Эти факторы можно учитывать отдельно

$$\xi = \kappa \xi' . \quad (31)$$

Здесь  $\kappa = k/\sigma_k$  - критерий качества мономобильной зарядки монодисперсных частиц и

$$\xi' = \frac{r}{k} \left| \frac{dk}{dr} \right| \quad (32)$$

критерий качества средней зарядки.

В работе /5/ проведен также графический анализ зависимости критерия качества средней зарядки от размера частиц и режима зарядки. На рис. 3 этот анализ повторяется для нашей системы параметров зарядника. Кривые на рис. 3 точно соответствуют кривым рис. 2. Как и на рис. 2, пятая кривая получает объяснение лишь в дальнейшем.

#### Неоднородность степени зарядки

Критерий  $\theta$  описывает неоднородность процесса зарядки. На практике основной интерес представляет режим преимущественно диффузионной зарядки, где неоднородность в силу эффекта насыщения выравнивается. Поэтому следует определить другой критерий для описания неоднородности степени диффузионной зарядки

$$\vartheta = \frac{\Delta A}{A} . \quad (33)$$

В первом приближении

$$\frac{\vartheta}{\theta} = \frac{\alpha}{A} \frac{dA}{d\alpha} . \quad (34)$$

Используя приближение (19), получим

$$\vartheta \approx \frac{4}{3(1+\alpha^{-4/3}) \ln(1+\alpha^{4/3})} \theta . \quad (35)$$

В области тех значений параметра  $\alpha$ , которые представляют наибольший практический интерес, критерий  $\vartheta$  составляет 25 ... 50% от критерия  $\theta$ .

## Устройства для зарядки частиц

### Зарядник Уитби

Оценим характеристики наиболее известного гранулометрического зарядника аэрозолей, описанного в работе /6/. Это типичный трансверсальный зарядник, в который аэроионы вводятся через сетку, поддерживаемую при определенном потенциале. Авторы зарядника представляют следующие данные:

высота $h$	1,43 см
длина	0,95 см
время $t_q$	0,21 с
напряжение	100 В
$nt_q$	$10^7 \text{ см}^{-3} \text{ с.}$

По представленным данным легко вычислить:

$$\begin{aligned}\alpha &= 27 \\ \beta &= 4 \text{ см/с} \\ \theta &= 1,75 \\ \vartheta &= 50\% \\ d_c &= 1,8 \text{ мкм.}\end{aligned}$$

Эти характеристики дают основание высказать сомнения относительно способности прибора к разрешению фракций в области размеров, близких к 1 мкм. Наш расчет указывает также простейший путь улучшения характеристик зарядника - увеличение длины зарядника и времени зарядки. При этом пропорционально уменьшаются  $\theta$  и  $\vartheta$ . После достижения достаточно малого значения критерия  $\theta$  можно за счет дальнейшего увеличения времени  $t_q$  уменьшить напряжение, что дает возможность повысить критический размер частиц.

Для оценки параметров новых моделей зарядника Уитби, разработанных позже прибора /6/, у нас нет достаточных количественных данных.

### Пути расширения диапазона размеров

Диапазон измерения по размеру для гранулометра, использующего режим преимущественно диффузионной зарядки, ограничен сверху. Единственный эффективный способ расширения диапазона измерения в сторону больших размеров - параллельное использование режима преимущественно ударной зарядки. Необходимы два зарядника: один с высоким значением критического размера, другой - с низким значением критического размера. Можно указать три основные технические решения:

1. Изготовить "двойной" прибор с параллельными измерительными конденсаторами, в одном из них используется режим преимущественно диффузионной, в другом - преимущественно ударной зарядки.

2. Устроить гранулометр так, что зарядник попеременно включается то в режим преимущественно диффузионный, то в режим преимущественно ударной зарядки.

3. Снабдить гранулометр двойным зарядником так, что основной зарядник работает в преимущественно диффузионном режиме, а вспомогательный - в преимущественно ударном режиме с противоположной по сравнению с основным зарядником полярностью.

#### Метод компенсационной зарядки

Третье техническое решение можно называть методом компенсационной зарядки. Корректная теория компенсационной зарядки не разработана. Грубые оценки можно получить путем сложения зарядов, отдельно рассчитанных для основного и вспомогательного зарядников. В таком приближении рассчитана самая нижняя кривая рис. 2, которая хорошо иллюстрирует практический эффект, достигаемый методом компенсации. Символы со штрихами при кривых обозначают параметры вспомогательного зарядника. На рис. 3 изображена также кривая качества средней зарядки для метода компенсации. Как видно, критерий качества средней зарядки все же имеет довольно глубокий минимум в области околосантиметровых размеров.

Если напряженность электрического поля во вспомогательном заряднике превышает критическое значение

$$E'_c = \frac{1 + 4/\alpha' \alpha \beta}{1 + 4/\alpha \kappa}, \quad (36)$$

то возникает перезарядка больших частиц на другую полярность. В формуле символы без штриха относятся к основному заряднику и символы со штрихом - к вспомогательному заряднику.

В практике допустимо небольшое превышение критической напряженности, поскольку перезарядка частиц, размеры которых выходят из диапазона измерения, не влечет отрицательных последствий. Кривые, иллюстрирующие на рис. 2 и 3 метод компенсационной зарядки, построены для зарядника с параметрами  $E'_c = 2200$  В/см и  $E' = 4000$  В/см.

Недостатком метода компенсационной зарядки является низкая подвижность крупных частиц, что существенно усложняет их регистрацию. Необходимость обеспечения исключительно высокой стабильности зарядников также может вызывать технические трудности.

#### Дезактивация воздуха методом обратной зарядки

В гранулометрах, как правило, используется дифференциальный метод измерения спектра подвижностей. При этом поток воздуха, входящий в измерительный конденсатор, делится на две части. Одна часть расходом  $\Delta\Phi$  содержит изучаемую заряженную аэрозоль. Другая часть расходом  $\Phi - \Delta\Phi$  должна быть неактивной. Неактивность означает, что воздух не содержит частиц, которые вызвали бы сигнал на выходе гранулометра. Обычно воздух для дезактивации пропускается через механический или электрический фильтр. Достаточно полная фильтрация воздуха является технически трудной задачей. Взамен фильтрации можно предложить дезактивацию воздуха униполярной зарядкой на обратную по сравнению с измеряемыми частицами полярность. Это упрощает конструкцию гранулометра. При дезактивации обратной зарядкой необходимо конкретно проверить, не вызывает ли объемный заряд обратно заряженного аэрозоля какие-нибудь помехи в измерительном конденсаторе. В случае необходимости следует объемный заряд подавить при помощи электрофильтра.

#### Эффект фокусирования

В гранулометрах Миннесотского университета геометрическое расположение слоев воздуха не сохраняется при переходе от зарядника к измерительному конденсатору. В таком случае неоднородность зарядки, безусловно, ухудшает разрешающую способность гранулометра.

Однако геометрическое расположение слоев воздуха может быть сохранено при переходе от зарядника в измерительный конденсатор. При этом станет существенным взаимоотношение процессов в заряднике и измерительном конденсаторе. Если зарядка абсолютно однородна ( $v = 0$ ), то места осаждения частиц одного и того же размера в измерительном конденсаторе рассеиваются в мере, определенной отношением расходов  $\Delta\Phi/\Phi$ . В случае  $v \neq 0$  и сохранения расположения слоев воздуха эффекты рассеивания за счет неоднородности зарядки и конечного отношения расходов интерферируются. Если частицы, входящие

ближе к собирающей обкладке измерительного конденсатора, заряжены сильнее, то интерференция усиливает рассеивание. Если частицы, входящие ближе к собирающей обкладке, заряжены слабее, то интерференция ослабляет рассеивание. В последнем случае неоднородность зарядки полезна. Такой эффект описан уже в работе /7/, но позже почти забыт.

Можно представить такую неоднородность зарядки, при которой расстояние места осаждения частицы от входа измерительного конденсатора вообще не зависит от точки входа частицы в гранулометр. Тогда будем говорить о совершенной фокусировке частиц.

Использование эффекта фокусирования позволяет выбрать в измерительном конденсаторе отношение  $\Delta\phi/\phi$  порядка 50% и одновременно обеспечить аппаратную функцию гранулометра, свойственную хорошему дифференциальному спектрометру. Это означает сочетание высокой чувствительности интегрального измерительного конденсатора с высокой разрешающей силой дифференциального измерительного конденсатора.

#### Внутренний зарядник для измерительного конденсатора с внутренней собирающей обкладкой

Схема одного из возможных конструкций осесимметричного зарядника изображена на рис. 4. Для создания легких аэро-

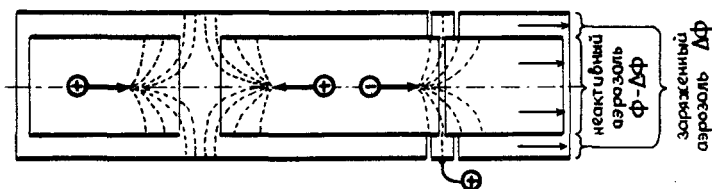


Рис. 4. Схема осесимметричного внутреннего зарядника для измерительного конденсатора с внутренней собирающей обкладкой.

зонов используется коронный разряд. Специальная конструкция позволяет обойти использование разделительной сетки. Напряженность электрического поля и поток аэроионов регулируются глубиной утопления положительных коронирующих острий во

внутреннюю трубу. Вспомогательный зарядник отрицательной полярности позволяет осуществить компенсационную зарядку. Интенсивность компенсационной зарядки устанавливается шириной щели. Напротив щели расположен электрод, на который подается напряжение для достижения достаточной напряженности электрического поля. Отрицательный зарядник одновременно выполняет функцию дезактивации воздуха, который с расходом  $\Phi - \Delta\Phi$  протекает через внутреннюю трубу.

В приборе описанного типа неоднородность зарядки усиливает рассеивание частиц по собирающей обкладке в измерительном конденсаторе.

#### Внешний зарядник для измерительного конденсатора с внутренней собирающей обкладкой

Для достижения эффекта фокусирования в случае внутренней собирающей обкладки необходимо движение легких аэроионов направить в сторону оси зарядника. Возможное устройство такого зарядника изображено на рис. 5. Наиболее трудно обеспечить

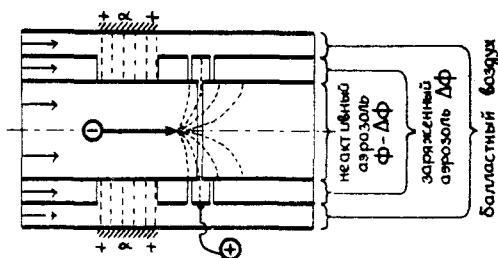


Рис. 5. Схема осесимметричного внешнего зарядника для измерительного конденсатора с внутренней собирающей обкладкой.

здесь независимость локальной интенсивности зарядки от угловой координаты. Использование коронного разряда как источника легких аэроионов усложнено. Компактная конструкция получается при создании легких аэроионов  $\alpha$ -излучением или мягким  $\beta$ -излучением. Радиоактивный препарат должен быть равномерно нанесен на внутреннюю поверхность цилиндрического электрода. В описываемом заряднике используется метод дезактивации воздуха обратной зарядкой, для этого служит внут-



ний коронный зарядник. Компенсационная зарядка осуществляется тем же способом, что и в заряднике рис. 4. Для изолирования радиоактивного перапарата и улучшения параметров зарядника используется внешний балластный слой воздуха, который протекает мимо измерительного конденсатора.

#### Внутренний зарядник для измерительного конденсатора с внешней собирающей обкладкой

Схема "внутренний зарядник и внутренняя собирающая обкладка" не обеспечит хорошей разрешающей способности гранулометра. Схема "внешний зарядник и внутренняя собирающая обкладка" теоретически может обеспечить высокую разрешающую способность и хорошую чувствительность, но изготовление реального гранулометра по этой схеме встречает довольно серьезные технические затруднения. Высокая разрешающая способность и простота изготовления сочетаются при схеме, изображенной на рис. 6. Здесь собирающей обкладкой служит внешняя обкладка измерительного конденсатора, что удобно в случае необходимости разделения собирающей обкладки на изолированные друг от друга кольца.

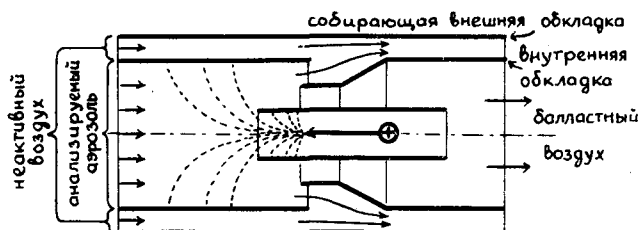


Рис. 6. Схема осесимметричного внутреннего зарядника для измерительного конденсатора с внешней собирающей обкладкой.

На рис. 6 не указаны устройство дезактивации воздуха и вспомогательный зарядник для компенсационной зарядки. Компенсационная зарядка при этой схеме не осуществляется столь просто, как в случае двух предыдущих схем. Поэтому схема "внутренний зарядник и внешняя собирающая обкладка" более всего подходит для двухконденсаторных систем, где в одном

**измерительном конденсаторе используется режим преимущественно диффузионной зарядки, а в другом измерительном конденсаторе - режим преимущественно ударной зарядки.**

Модуляционный метод измерений в гранулометрии аэрозолей

#### Цифровое синхронное детектирование и сущность модуляционного метода

О модуляционном методе говорят, когда коэффициент передачи измеряемого сигнала варьируется по периодическому закону и выходной сигнал прибора образуется в результате детектирования, чаще всего синхронного детектирования. При аэроионных измерениях модуляцию целесообразно осуществить путем периодического полного выключения и включения измеряемого сигнала. Методы модуляции сигнала внутри усилительного тракта мы здесь не рассматриваем.

Оптимальный период модуляции зависит как от частотной характеристики шумов измерительной системы, так и от переходных характеристик самого модулятора потока аэроионов и измерительного конденсатора. В случае измерения легких аэроионов выгодно иметь период модуляции от нескольких десятых долей секунды до нескольких секунд. В гранулометрии аэрозолей регистрируются аэроионы малой подвижности и инерционность измерительного конденсатора большая. Оптимальным может оказаться период модуляции в несколько десятков секунд и более. При этом использование традиционной аналоговой техники синхронного детектирования встречает определенные затруднения.

В области низких частот модуляцией появляется возможность преобразовать сигнал в цифровую форму в каждом полупериоде модуляции. Детектирование осуществляется тогда при помощи вычислительного устройства. Цифровую обработку сигнала можно выполнить на линии с вычислительным устройством. В этом случае процесс измерения остается внешне довольно похож на процесс измерения с аналоговым синхронным детектированием. При отсутствии возможности пользоваться вычислительным устройством на линии, сигнал может быть в каждом полупериоде зарегистрирован на магнитную ленту, перфоленту, или другой носитель информации, а вычисления могут быть выполнены позже.

Тогда процедура измерения внешне мало напоминает обычную процедуру измерения с использованием аналогового синхронного детектора. Может создаться впечатление, что мы уже не имеем дело с модуляционным методом, а попросту производим периодическую проверку нуля, чтобы использовать соответствующие данные для коррекции результатов в стадии обработки наблюдений. Это впечатление еще усиливается, когда по техническим причинам для усиления сигнала используется усилитель постоянного тока. Однако существует некоторая более глубокая разница между методами модуляции и периодической коррекции нуля. В случае метода модуляции период модуляции является одновременно и минимальным периодом измерения. В случае метода периодической коррекции нуля период измерения короче периода коррекции нуля, причем отношение периодов может быть довольно большое. Поэтому мы считаем уместным говорить о модуляционном методе измерения и в случае, когда сигнал усиливается усилителем постоянного тока, период модуляции длится минутами, а синхронное детектирование отложено до этапа обработки наблюдений.

#### Модуляция зарядником

В приборах для измерения аэроионов модуляция осуществляется или путем переключения расхода воздуха, или путем переключения напряжения измерительного конденсатора, или путем переключения напряжения специального предварительного конденсатора. Все эти способы могут быть использованы и в гранулометрии аэрозолей. Однако здесь возможен более простой способ модуляции посредством периодического включения и выключения униполярного зарядника аэрозолей.

Методу модуляции зарядником свойственны все преимущества метода модуляции предварительным конденсатором. Особое внимание заслуживает одно специфическое для гранулометрии преимущество. При модуляции зарядником поток остаточных аэроионов в воздухе, который должен быть неактивным, не модулируется. Это подавляет ошибки измерения, связанные с возможным несовершенством устройства дезактивации воздуха и тем самым позволяет упростить конструкцию этого устройства. Появляется возможность реализовать дифференциальный метод измерения вообще без устройства для дезактивации воздуха. Например, в приборе, схема которого изображена на рис. 6, неактивным воздухом может служить тот же аэрозоль, который

подлежит анализу, только в незаряженном виде. Модуляция осуществляется здесь периодическим включением и выключением высокого напряжения на коронирующем острие.

### КС-режим измерения силы тока

Рассмотрим задачу измерения силы постоянного тока аэроионов в измерительном конденсаторе и обозначим время протекания постоянного тока или цикл измерения через  $\Delta$ . Пусть переходный процесс измерительного устройства является простым экспоненциальным процессом с постоянной времени  $\tau$ .

Распространены два режима измерения:

- режим измерения силы тока по падению напряжения на сопротивлении или К-режим, где предполагается  $\tau \ll \Delta$ ,
- режим накопления заряда на емкости или С-режим, где предполагается  $\tau \gg \Delta$ .

Как известно, К-режим характеризуется пониженной чувствительностью, а С-режим требует периодического коммутирования входной цепи электрометрического усилителя. Известны два варианта С-режима:

- вариант фиксированного нуля,
- вариант плавающего нуля.

В случае фиксированного нуля заряд, генерируемый электрометрическим коммутатором, входит как шум в результат измерения. Поэтому здесь электрометрический коммутатор должен удовлетворять исключительно жестким требованиям, а чувствительность электрометра не будет существенно выше чувствительности электрометра в К-режиме. Вариант плавающего нуля позволяет реализовать максимальную теоретически возможную чувствительность, но здесь требуются сложные устройства для коммутации и регистрации сигнала.

По причине технической простоты в практике наиболее распространен К-режим. Поэтому особый интерес представляют пути повышения чувствительности К-режима. Чувствительность электрометра в К-режиме на силу тока тем лучше, чем больше отношение  $\tau/\Delta$ . При  $\tau/\Delta \gg 1$  чувствительность приближается к чувствительности электрометра в С-режиме. Однако, если условие  $\tau \ll \Delta$  не выполняется, то возникает систематическая ошибка измерения, которая называется ошибкой инерционности. Ошибка инерционности зависит от отчета электрометра в конце предыдущего цикла. Если этот отчет известен, то ошибка инерционности может быть однозначно определена и результат из-

мерения вычислительным путем скорректирован. В случае вычислительной коррекции ошибки инерционности вполне допустим режим измерения, в котором  $\tau \approx \Delta$ . Такой режим может быть обозначен, как RC-режим.

### Коррекция ошибки инерционности

Рассмотрим измерение силы периодически включаемого и выключаемого тока, что характерно для модуляционного гранулометра. Процесс в электрометре с RC-режимом иллюстрируется на рис. 7.

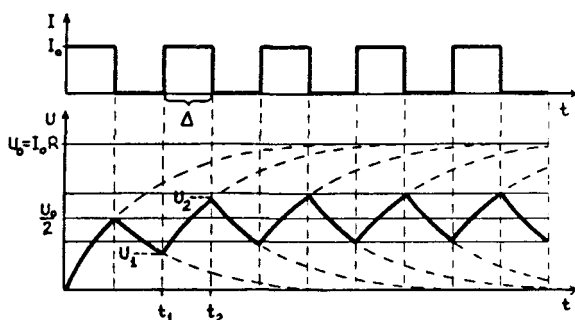


Рис. 7. Процесс в электрометре с RC-режимом при прямоугольной модуляции измеряемого тока.

Допустим, что известны  $\Delta$ ,  $\tau$ ,  $U_1$  и  $U_2$ . Для коррекции ошибки измерения необходима такая формула вычисления уровня  $U_0$ , которая была бы действительной в любом периоде модуляции независимо от предистории процесса. Такая формула просто выводится по уравнению переходного процесса, согласно которому

$$U_0 - U_2 = (U_0 - U_1) e^{-\frac{t_2 - t_1}{\tau}}. \quad (37)$$

Формула коррекции будет

$$U_0 = U_2 + \frac{e^{-\Delta/\tau}}{1 - e^{-\Delta/\tau}} (U_2 - U_1). \quad (38)$$

Коррекцию целесообразно выполнить совместно с синхронным детектированием. Поскольку множитель в формуле (38) является постоянной аппаратуры, то коррекция легко выполняется и в случае аналогового синхронного детектирования.

### Л и т е р а т у р а

1. Whitby, K.T. Electrical measurement of aerosols. In: Fine particles. Aerosol generation, measurement, sampling and analysis. New York - San Francisco-London, 1976, p. 581-624.
2. Таммет А.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып.348, с.30-34.
3. Мирзабемян Г.З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда. - В кн.: Сильные электрические поля в технологических процессах. М., 1969, с. 20-39.
4. Таммет А.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1967, вып. 195, 234 с.
5. Тамм Э.И. О функциональной зарядке аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып.348, с.35-55.
6. Liu, B.Y.H., Whitby, K.T., Pui, D.Y.H. A portable electrical analyser for size distribution measurement of submicron aerosols. - APCA Journal, 1974, Vol. 24, No. 11, p. 1067-1072.
7. Yosikawa, H.H. et al. Electrostatic particle size analyser. - Rev. Sci. Instr., 1956, Vol.27, No.6, p. 359-362.

# ON THE TECHNIQUES OF AEROSOL ELECTRICAL GRANULOMETRY

H. Tammet

## S u m m a r y

The paper starts with an analysis of the problem of the unipolar charging of particles. The discussion is based on the simplified theory of Mirzabekyan [3]. Instead of the product of the concentration of small air ions and the charging time the author makes use of the more general parameter of charging  $\alpha$  (Formulas 1 & 2). The initial moment of time is chosen in such a way that the equation of the electrostatic scattering of small air ions (4) should satisfy the condition  $t_0 = 0$ . The inhomogeneity of the charging process of the transversal charger (Figure 1) is described by the parameter  $\theta$  (Formula 6) and the inhomogeneity of the charge in diffusion charging is described by the parameter  $\nu$  (Formulas 34 & 35). One of the basic results drawn in the paper is the conclusion that the average intensity of the electrical field in the transversal charger is directly associated with inhomogeneity through Equation (11),  $k$  signifies the mobility of small air ions. The coefficient  $\beta$  of the equation (Formula 12) is regarded as the second basic parameter. Using the parameters defined above, it is possible to express the charging model of Mirzabekyan by Equation (24), which explicitly shows the character of essential relations. The quantitative dependence of the properties of the charger on the basic parameters is demonstrated by the mobility curves presented in Figure 2. Figure 3 indicates the dependence of the quality criterion of average charging on the particle diameter. Equation (20) approximately describes the minimum of the mobility curve or the zero of the quality curve.

The second part of the paper deals with particular techniques of charging particles. It is shown that the inhomogeneity of the Whitby charger [6] is large and that the point of the minimum of the mobility curve is  $1.8 \mu\text{m}$ , which restricts the resolution power in the range of larger diameters. With the aim of extending the measuring range, it is necessary to use the regime of diffusion charging and that of field charging in parallel. One possibility is the

aftercharging of the particles charged by the diffusion charger by means of a field charger of opposite polarity whose intensity is so small that it only reduces the mobilities of larger aerosol particles. A possible effect is shown by the fifth curve given in Figures 2 and 3. The differential mobility analyzer of the granulometer requires nonactive additional air. In order to obtain it, a unipolar charger of opposite polarity can be used instead of a filter. The granulometer can be built in such a way that the inhomogeneity of the charger does not prove detrimental, but rather useful. A reduction in the dispersion of deposition distances due to an appropriate inhomogeneity of charging is called a focusing effect. The focusing effect is achieved when an outer charger (Figure 5) is added to the measuring condenser with a collecting inner cover or when an inner charger (Figure 6) is added to a measuring condenser with a collecting outer cover.

In the third part of the paper the author discusses problems which arise in the application of the modulation method. Due to the great inertia of the measuring condenser, it is expedient to demodulate a signal numerically. The charger may be used as a modulator; in this case the residual air-ion flux of the additional air remains unmodulated. This makes it unnecessary to filtrate the additional air. When the modulated flux of charged particles is used, the RC regime of the electrometer may be recommended, in which case the relaxation time  $\tau$  is nearly equal to a half period (see Figure 5). The error due to inertia is corrected numerically.



## ПОЛЕВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУХА С МОДУЛИРУЮЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОНДЕНСАТОРОМ

К.П. Леппик, Х.Ф. Таммет, Ф.Г. Миллер, Я.Й. Сальм

Хотя принцип модулирующего измерительного конденсатора известен в литературе /1, 2/, все же он до сих пор в малой мере внедрен в практику измерений. Первыми двумя авторами настоящей статьи сконструирован счетчик легких аэроионов с модулирующим измерительным конденсатором /3/, схему электрометра которого позже усовершенствовал третий автор.

Для регулярных атмосферно-электрических измерений в сети гидрометеорологических станций в первую очередь требуется надежный по отношению к разным климатическим условиям полевой измеритель проводимости воздуха. Поэтому авторами настоящей статьи было предпринято конструирование опытного макета такого измерителя с модулирующим измерительным конденсатором. Главную ценность модулирующего измерительного конденсатора мы видим в низких требованиях к изоляции собирающей обкладки, что позволяет измерителю работать при большой относительной влажности без специальных защитных мер. Также возможна длительная работа без чистки изоляторов.

Устройство измерителя принципиально похоже на ранее изготовленный счетчик /2/. Значительно (приблизительно в 3 раза) увеличены размеры измерительного конденсатора, чтобы обеспечить большой расход воздуха (около 100 л/с). Большой расход целесообразен для достижения соответственно большой силы тока с собирающей обкладки, что повышает надежность в работе и уменьшает ошибки измерения.

Общее устройство измерителя проводимости поясняет его функциональная схема (рис. 1). Измерительный конденсатор имеет одну заземленную внешнюю обкладку и три внутренние обкладки. По потоку воздуха первая из них является модулирующей, вторая — экранной, а третья — собирающей. Модулирующая обкладка  $C_1$  модулирует концентрацию легких аэроионов, в основном обуславливающих проводимость. На эту обкладку подается модулирующее однополярное напряжение симметричной формы с частотой 1 Гц и амплитудой 450 В. Поток воздуха, поступающий к собирающей обкладке, периодически очищается от аэроионов с подвижностью  $k \gg 0,5 \text{ см}^2/(\text{В.с})$ . Таким образом, в приборе

модулируется измеряемая величина — проводимость. Коэффициент модуляции близок к 100%. На собирающую обкладку  $C$  подается через высокоомный резистор  $R$  постоянное стабилизированное напряжение  $U = 200$  В. Предельная подвижность здесь равна  $2,2 \text{ см}^2/(\text{В.с})$ . Переменный (с частотой 1 Гц) ток проводимости усиливается электрометрическим усилителем ЭЛ, усилителем  $У$ , детектируется синхронным детектором СД и после сглаживания фильтром ФИЛ регистрируется прибором р/п. Симметричный мультивибратор МВ управляет модулятором  $U_1$  и синхронным детектором. Блок питания БП обеспечивает электронную схему необходимыми напряжениями и питается от сети 220 В.

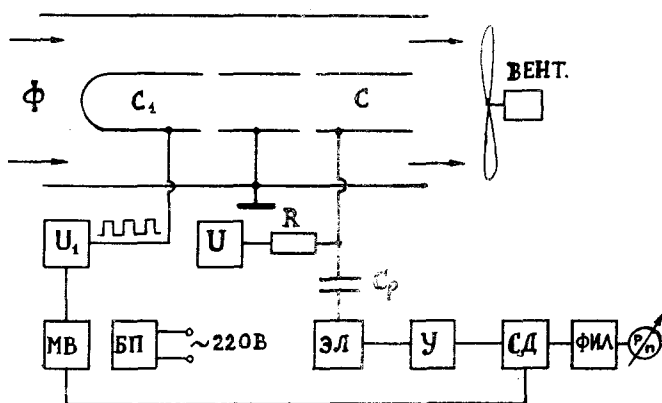


Рис. 1. Функциональная схема измерителя проводимости воздуха с модулирующим измерительным конденсатором.

Электрометрический каскад выполнен в виде компактного, легко сменяемого блока (рис. 2). В используемом в конкретном приборе блоке  $C_1 = 1,2 \text{ пФ}$  и  $R_2 = 330 \text{ Гом}$ . На вход электрометра сигнал поступает через разделительный конденсатор  $C_p$  (рис. 1)  $10-470 \text{ пФ}$ .

От перегрузки входной каскад защищен с помощью нормально замкнутых контактов реле, изготовленного на базе реле РЭС-10. При включении прибора вход электрометрического усилителя открывается с помощью реле времени лишь после окончания пере-

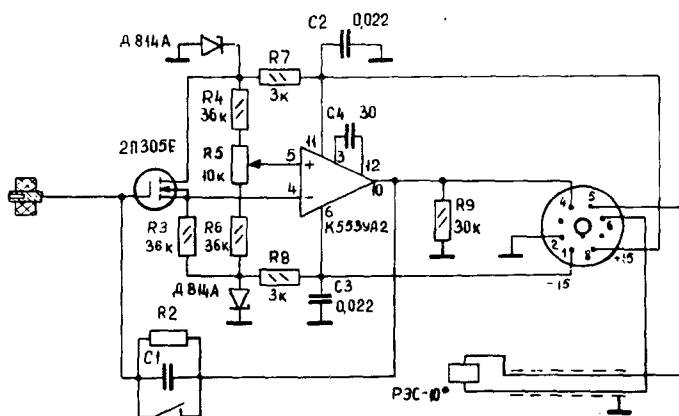


Рис. 2. Электрометрический входной каскад усилителя тока проводимости.

ходных процессов во входной цепи (через I мин.). При выключении прибора или при исчезновении сетевого напряжения контакты защитного реле замыкаются в течение нескольких миллисекунд. Напряжение же на собирающей обкладке остается практически неизменным в течение большего времени после исчезновения питающего напряжения. Такая схема защиты позволила электрометру безотказно работать при испытаниях в течение нескольких месяцев, причем были многочисленные случаи пропажи сетевого напряжения.

Испытания измерителя проводимости проводились сначала в лабораторных условиях (в помещении). Температура колебалась от  $+5^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$ . Измеритель работал около 500 часов. Потребовалась лишь незначительная подрегулировка схемы.

В марте-апреле-мае измеритель был установлен на чердаке трехэтажного дома в городе. Чердак продувался наружным воздухом. Температура колебалась от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность поднималась иногда выше 90%. Обычно измеритель включался в 8 часов утра и выключался в 21-в 22 часа вечера, всего проработав на чердаке около 600 часов. Было установлено, что дрейф нулевого показания за сутки не превышает  $\pm 0,2$  фсм/м при пределе измерения 3,9 фсм/м, а шум  $\pm 0,1$  фсм/м

при постоянной времени 80 с. В ходе испытаний измеритель лишь один раз вышел из строя (заклинился двигатель вентилятора).

Третий этап испытаний был проведен в июле-августе-сентябре на побережье моря в ЭССР. Измеритель был установлен открыто в поле и непрерывно работал около 1500 часов, т.е. свыше двух месяцев. Отказы в работе наблюдались только у контакта собирающей обкладки, который впоследствии был заменен.

### Л и т е р а т у р а

1. Junod, A., Sängler, R., Thams, J., *Energistrement direct du spectre des petits ions atmosphériques*, Z. angew. Math. und Phys., 1962, 13, N. 3, 272-278.
2. Таммет А.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 195, 1967, с. 47-52.
3. Таммет А.Ф., Леппик К.П. Опытный счетчик легких аэроионов с модулирующим измерительным конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 20-25.

### AN AIR CONDUCTIVITY METER WITH A MODULATING MEASURING CAPACITOR

K. Leppik, H. Tammet, F. Miller and J. Salu

### S u m m a r y

A modulating measuring capacitor in an aspiration-type air conductivity meter makes it possible to render the continuous measuring of outer air conductivity more reliable: the meter of alternating conduction current does not present the insulation of the measuring capacitor any high demands in outer conditions. The measuring instrument has no need for zeroing. The paper describes the design, parameters and testing results of the measuring instrument.

## О РАЗРЯДКЕ УНИПОЛЯРНО ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

М.Г. Ноппель, Э.И. Тамм

Электрической зарядке аэрозольных частиц легкими аэроионами посвящено много теоретических работ. Число экспериментальных исследований гораздо меньше. Получаемые теоретические результаты обычно сравниваются с экспериментальными результатами Альбита /7/, которые в области крупных частиц ( $r \geq 0,1$  мкм) до сих пор являются наиболее точными. Для мелких частиц некоторые экспериментальные данные о зарядке приведены Пуи /10/.

Из теоретических работ наилучшее совпадение с экспериментом получено в работах /1, 8/, где численными методами решается общее дифференциальное уравнение зарядки, учитывающее одновременно диффузию ионов и направленное движение их в суммарном электрическом поле, созданном внешними поверхностными зарядами и самой заряженной и поляризованной частицей. Попытки учитывать зеркальные силы ухудшали совпадение с опытом /10/.

Для практических инженерных расчетов, встречающихся при разработке аэрозольных приборов, решение общего уравнения слишком трудоемко. Здесь обычно применяют формулы, полученные при раздельном рассмотрении диффузионного /6, 5, 12/ и ударного /11, 9/ механизмов зарядки. Основные затруднения возникают в случае зарядки частиц в сильном электрическом поле, при существенных значениях проводимости газовой среды, когда необходимо учитывать оба механизма зарядки. Мирзабекян было доказано /1/, что в широком диапазоне размеров частиц сумма зарядов, вычисленных для ударного механизма зарядки формулой Романа-Потенье и для диффузионного механизма зарядки по теории Арендта-Каллмана-Фукса, отличается от значения заряда, получаемого при интегрировании точного дифференциального уравнения, не более чем на 20%. Во многих случаях инженерных расчетов такое суммирование зарядов нашло применение.

Вопрос о нейтрализации униполярно заряженных частиц униполярными ионами противоположного знака (разрядка частиц) не рассматривался в литературе, по-видимому, из-за отсутствия приложений. Для реализации в электрической гранулометрии

аэрозолей идеи компенсационной зарядки, выдвинутой Тамметом /4/, решение этого вопроса необходимо. В данном сообщении решается задача отдельно для ударного и диффузионного механизмов зарядки. Результаты сравниваются с результатами, полученными при интегрировании общего дифференциального уравнения. Коротко описывается и алгоритм численного интегрирования общего уравнения; подробное описание алгоритма и основные данные будут опубликованы позже.

Ударный механизм зарядки. Рассмотрим шарообразную частицу радиусом  $r$  и зарядом  $Q$ , из вещества с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , находящуюся в однородном внешнем электрическом поле с напряженностью  $E_0$ , в ионизированном газе с проводимостью  $\lambda = q n_0 k$ , вызванной моноомобильными легкими аэроионами подвижности  $k$ , заряда  $q$  и концентрации  $n_0$  (рис. 1). Заряд иона  $q$  и подвижность  $k$  считаются алгебраическими величинами. Тогда  $\lambda$  есть положительная величина. Используем сферическую систему координат с началом в центре частицы, направляя ось  $z$  при  $q > 0$  против направления вектора  $E_0$ , а при  $q < 0$  по направлению  $E_0$  (рис. 1). Повторяя вывод формулы Романа-Потенье в системе единиц СИ, получим для радиальной составляющей напряженности

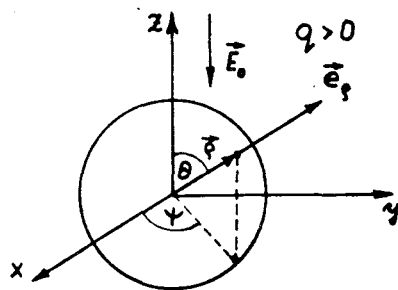


Рис. 1. Шарообразная частица во внешнем поле и ионизированной атмосфере.

поля (без учета зеркальной силы):

$$\vec{E}_s = \left[ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{q}{|q|} E_0 \left( 1 + \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \frac{r^3}{r^3} \right) \cos \theta \right] \vec{e}_s. \quad (I)$$

Здесь  $Q$  - заряд частицы,  $g$  - радиальная координата рассматриваемой точки пространства,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\vec{e}_g$  - радиальный орт локальной прямоугольной системы координат в данной точке.

Поток заряда на частицу:

$$\Phi_{|g=r} = \lambda \int_S \vec{E}_{|g=r} d\vec{S}_{|g=r}. \quad (2)$$

$S$  означает часть поверхности частицы, на котором движение ионов оказывается направленным к частице. При  $q > 0$  на этой части поверхности  $\vec{E}_g \uparrow d\vec{S}$ , при  $q < 0$ ,  $\vec{E}_g \uparrow d\vec{S}$ . Описанный выше способ выбора направления оси  $z$  позволяет поставить пределы интегрирования одинаково для обоих случаев - по углу  $\psi$  от 0 до  $2\pi$ , по углу  $\theta$  - от 0 до  $\theta_0$ , при котором  $E_g|_{g=r} = 0$ .  $\theta_0$  определяется условием:

$$\cos \theta_0 = \frac{Q}{Q_{\infty}}, \quad (3)$$

где

$$Q_{\infty} = 4\pi\epsilon_0 \frac{q}{|q|} E_0 M r^2; \quad M = 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}.$$

Интегрирование дает для потока заряда выражение:

$$\Phi_{|g=r} = \frac{\lambda Q}{2\epsilon_0} (1 - \cos \theta_0) - \pi \lambda r^2 \frac{q}{|q|} E_0 M (1 - \cos^2 \theta_0),$$

которое для случая  $|Q| > |Q_{\infty}|$  и  $\frac{Q}{|Q|} \neq \frac{q}{|q|}$  упрощается:

$$\Phi_{|g=r} = \frac{\lambda Q}{\epsilon_0}.$$

Заряд частицы вычисляется, решая дифференциальное уравнение:

$$\frac{dQ}{dt} = -\Phi_{|g=r} \quad (4)$$

с начальным условием:  $Q|_{t=0} = Q_0$ . Вводя, согласно Таммету /4/, безразмерный параметр зарядки

$$\alpha = \frac{\lambda t}{\epsilon_0},$$

( $t$  - время, отсчитанное от начала процесса зарядки), результаты решения уравнения (4) можно записать:

$$\text{I } |Q_0| > |Q_{\infty}|, \quad \frac{Q_0}{|Q_0|} \neq \frac{q}{|q|};$$

$$\text{а) } \alpha < \alpha_{\infty} = -\ln\left(-\frac{Q_{\infty}}{Q_0}\right),$$

$$Q = Q_0 e^{-\alpha}; \quad (5)$$

$$\text{б) } \alpha \geq \alpha_{\infty},$$

$$Q = Q_{\infty} \left[ 1 - \frac{1}{\frac{\alpha - \alpha_{\infty}}{4} + \frac{1}{2}} \right]. \quad (6)$$

$$\text{II } |Q_0| \leq |Q_{\infty}|;$$

$$Q = Q_{\infty} \left[ 1 - \frac{1}{\frac{\alpha}{4} + \frac{1}{1 - (Q_0/Q_{\infty})}} \right]. \quad (7)$$

$$\text{III } |Q_0| > |Q_{\infty}|, \quad \frac{Q_0}{|Q_0|} = \frac{q}{|q|};$$

$$Q = Q_0 = \text{const.}$$

В случаях I и II при  $\alpha \rightarrow \infty$  (т.е. при  $t \rightarrow \infty$ )  $Q = Q_{\infty}$ .  $Q_{\infty}$  есть предельный заряд для данных условий зарядки.

Диффузионный механизм зарядки. Рассмотрим здесь такую же ситуацию, как в случае ударного механизма, но считаем  $E_0 = 0$ . Это - идеализированный предельный случай, т.к. поля, созданного объемным зарядом ионизированного газа, нельзя устранить. Если пренебречь зеркальными силами, то ионы могут попадать на частицу только за счет теплового движения. Так как поверхность частицы поглощает ионы, вблизи частицы создается градиент концентрации ионов, и они диффундируют в направлении частицы. Отсюда и название механизма зарядки. Кулоново поле заряженной частицы содействует или противодействует диффузии, в зависимости от знаков заряда частицы и иона.

Следуя Фуксу /5/ и Мирзабекяну /1/, поток заряда через концентрическую с частицей сферическую поверхность радиуса  $\varrho$  можно записать

$$\Phi = 4\pi\varrho^2 q \left( nkE_s - D \frac{\partial n}{\partial \varrho} \right). \quad (8)$$



Здесь  $D = KT \frac{k}{q}$  - коэффициент диффузии ионов,  $K$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура, остальные обозначения совпадают с прежними. Выражение (8) есть дифференциальное уравнение для концентрации ионов  $n$ . Учитывая граничное условие:

$$n|_{q \rightarrow \infty} = n_0,$$

получим решение:

$$n = \exp\left(-\frac{\varphi_0 q}{KT}\right) \left[ n_0 - \int_{\infty}^q \frac{\Phi}{4\pi q^2 D q} \exp\left(\frac{\varphi_0 q}{KT}\right) dq \right], \quad (9)$$

где  $\varphi_0 = \int_{\infty}^q E_q dq$  - потенциал кулонового поля частицы. Учитывая второе граничное условие  $n|_{q=\tau} = 0$  и выражение для потенциала

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{q},$$

получим

$$\Phi = -\frac{4\pi D n_0 q}{\int_{\tau}^{\infty} \frac{1}{q^2} \exp\left(\frac{\varphi_0 q}{KT}\right) dq} = \frac{\lambda Q}{\epsilon_0 \left[ 1 - \exp\left(\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 KT \tau}\right) \right]}. \quad (10)$$

Здесь через  $\lambda$  обозначена проводимость атмосферы далеко от частицы, где концентрация ионов равна  $n_0$ . Заряд частицы как функция времени находится опять решением дифференциального уравнения типа (4) при начальном условии  $Q|_{t=0} = Q_0$ . Обозначая аргумент экспоненциальной функции в (10) через  $A$

$$A = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 KT \tau}, \quad (11)$$

и вводя опять параметр зарядки  $\alpha$ , получим

$$\int_{A_0}^A (e^A - 1) \frac{dA}{A} = \alpha,$$

$$E_i(A) - E_i(A_0) - \ln \frac{A}{A_0} = \alpha,$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A^i - A_0^i}{i \cdot i!} = \alpha,$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A^i}{i \cdot i!} = \alpha + \alpha_0. \quad (I2)$$

Здесь введены обозначения:

$E_i(A) = \int_{-\infty}^A \frac{1}{A} e^A dA$  - интегральная экспоненциальная функция,

$$\alpha_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_0^i}{i \cdot i!},$$

и применено разложение

$$E_i(A) = 0,5772 + \ln|A| + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A^i}{i \cdot i!}.$$

В случае разрядки частиц, когда  $\frac{Q}{|Q|} \neq \frac{q}{|q|}$  получается  $A_0 < 0$  и  $\alpha_0 < 0$ .

Выражение (I2) есть уравнение для определения  $A$  по заданному  $\alpha$ . Уравнение решается только численно. В случае разрядки при малых  $\alpha$ , пока  $\alpha + \alpha_0 < 0$  получается  $A < 0$ , т.е. знак заряда еще противоположен знаку ионов. При  $\alpha = \alpha_0$  получается  $A = 0$ . Отсюда видно, что  $|\alpha_0|$  есть значение параметра  $\alpha$ , необходимое для полной нейтрализации начального заряда частицы.

Если частица с начальным зарядом  $Q_0$  дозарядается ионами того же знака, то  $\alpha_0$  означает значение параметра  $\alpha$ , при котором в диффузионном режиме зарядки незаряженная в начальный момент частица приобрела бы заряд  $Q_0$ .

Заряд частицы после решения уравнения (I2) вычисляется из (II):

$$Q = \frac{4\pi\epsilon_0}{q} K T n A(t). \quad (I3)$$

Решение общего дифференциального уравнения зарядки частицы.

Общее дифференциальное уравнение зарядки сферических частиц можно записать в следующем виде:

$$\Delta n + \frac{k}{D} \nabla \varphi \cdot \nabla n = 0. \quad (I4)$$

Граничные условия те же, что при рассмотрении диффузионной зарядки отдельно:

$$\begin{aligned} n_{|g \rightarrow \infty} &= n_0, \\ n_{|g=0} &= 0. \end{aligned}$$

Пренебрегая зеркальными силами, для потенциала получается выражение:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{g} + E_0 g \left( 1 - \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \frac{r^3}{g^3} \right) \cos \theta. \quad (15)$$

Для решения этого уравнения и определения величины потока  $\Phi_u$  числа ионов к аэрозольной частице использован численный метод, т.н. метод матричной прогонки, предложенный Мирзабекяном [2]. Этот метод связан с обращением матриц. Число обращений зависит от числа шагов по переменной  $g$ , а порядок обрабатываемых матриц — от числа шагов по  $\cos \theta$ . Вычислительное время можно заметно уменьшить, связывая матрицы с симметричными матрицами делением и умножением некоторых их элементов на постоянное число  $\sqrt{2}$ . Теперь все обращения делаются симметричными матрицами, а потом восстанавливается несимметричный вид конечной матрицы. Для обращения матриц были использованы подпрограммы **DSINV** и **DMFSD** [3]. Вычисления были проделаны на ЭВМ ЕС-1022 и М4030.

При определении потока при больших значениях заряда, пришлось уменьшить шаг по переменной  $g$ , что вызвало увеличение вычислительной погрешности в такой мере, что она превышала значение потока. Поэтому вычисления были проведены с удвоенной точностью, что позволяло следить за уменьшением погрешности метода при уменьшении шагов переменных. Поток ионов на частицу были определены с точностью 0,5%.

С увеличением значения заряда для получения требуемой точности придется уменьшать величины шагов, т.е. увеличивать число обращений и порядок матриц. Соответственно увеличивается и время определения потока. Например, при увеличении порядка матрицы от 13 до 25, время определения потока увеличивается в примерно 5,5 раза. Если знак заряда частицы совпадает со знаком заряда ионов, то при использованных значениях заряда, время счета одного варианта изменялось от 2 до 45 мин (ЕС-1022). При разрядке частиц время вычисления потока всегда меньше 2 мин.

На рис. 2 приведены некоторые кривые зарядки, вычисленные следующим образом.

Обратное значение потока  $\Phi_u$ , как функция от заряда  $Q$ , аппроксимировалось полиномами пятой степени, используя для этого вычисленные по описанному выше алгоритму значения потока. Затем, в результате интегрирования этих полиномов по заряду, были найдены кривые зарядки. На рисунке на оси абсцисс отложено произведение  $kn_0t$ , т.к. именно это произведение, пропорциональное проводимости, однозначно определяет величину заряда частицы в любой момент времени при фиксиро-

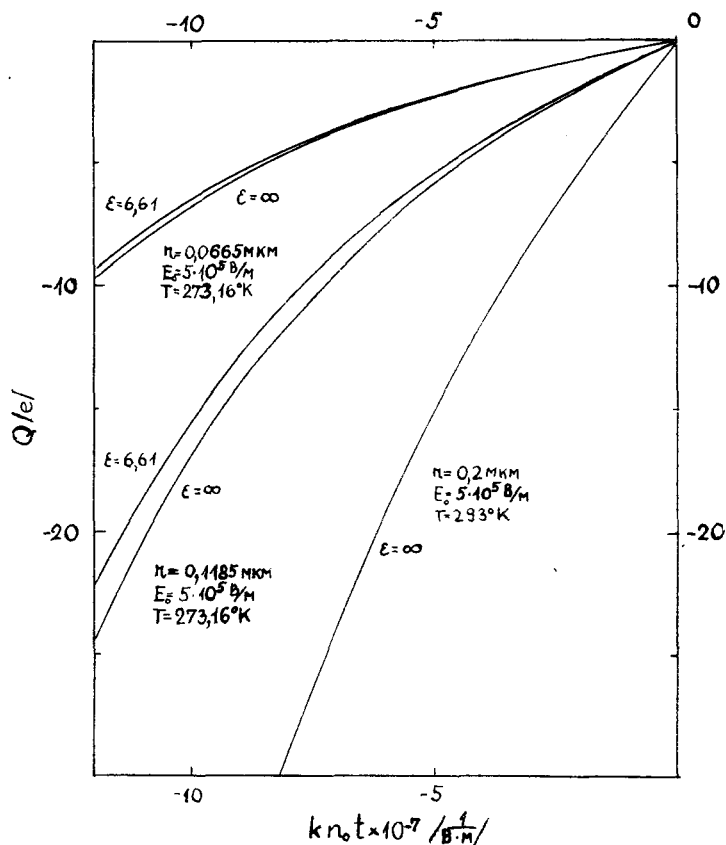


Рис. 2. Кривые разрядки частиц.

ванных условиях ( $E_0$ ,  $T$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$ ). Практически в зарядниках удастся контролировать и стабилизировать именно это произведение лучше, чем произведение  $n_0 t$ , которое часто применяется в роли параметра зарядки. Нуль на оси  $kn_0 t$  выбран в момент, когда заряд частицы достигает нуля.

На оси ординат отложен заряд аэрозольной частицы в элементарных зарядах. Знак минус указывает на противоположную заряженность частицы и ионов.

Сравнение результатов вычислений по описанным выше теориям разрядки позволяет выяснить возможности применения в грубых расчетах упрощенных моделей. На рис. 3 изображены кривые разрядки для частиц радиусом 0,2 мкм,  $\epsilon = \infty$  (прово-

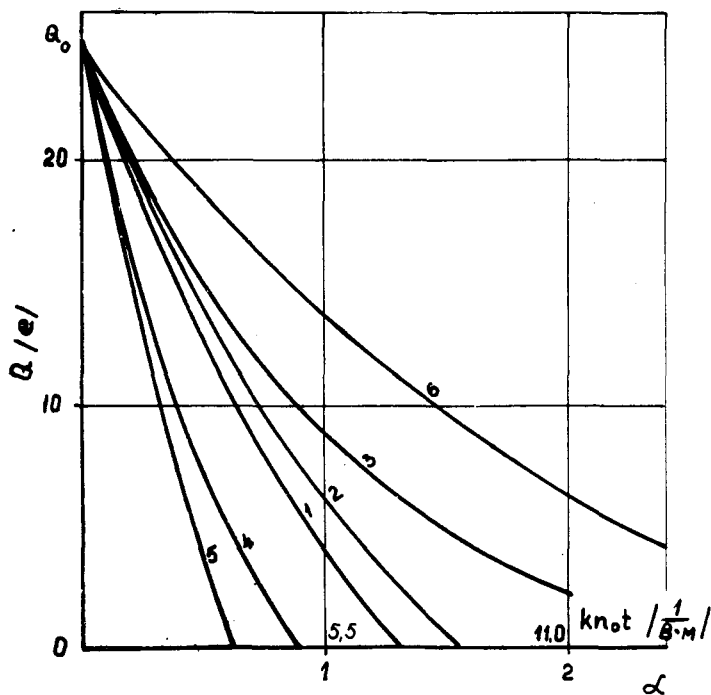


Рис. 3. Сравнение теорий разрядки.

дущее вещество) и  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . Кривая 1 получена интегрированием общего дифференциального уравнения (14) при  $E_0 = 5 \text{ кВ/см}$ , кривая 2 вычислена по формуле (7) при том же значении  $E_0$ , кривая 3 — по теории чисто диффузионной зарядки при  $E_0 = 0$ . Кривая 5 получена суммированием изменений заряда с кривых 2 и 3. Кривая 4 получена по следующему алгоритму: по формулам обоих механизмов разрядки вычисляются изменения заряда за малое приращение  $\Delta\alpha$ , складываются, и вычитаются от  $Q_0$ ; оставшийся заряд считается за новый начальный заряд и цикл вычислений повторяется. Кривая 6 получена по модели, принятой Тамметом в /4/. Тут от  $Q_0$  вычтены заряды, получаемые частицей при данном значении  $\alpha$  отдельно по обоим механизмам зарядки в предположении, что процесс зарядки начинается с нулевого заряда.

### Л и т е р а т у р а

1. Мирзабекян Г.З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда. — Б сб.: Сильные электр. поля в технол. процессах. М., 1969, с. 30-39.
2. Мирзабекян Г.З. Некоторые вопросы теории зарядки аэрозоля в поле коронного разряда. Канд. дисс., М., 1966.
3. Сборник научных программ на фортране. Вып. 2. М., 1974, с. 74, 138.
4. Таммет А.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. В наст. сб.
5. Фуко И.А. О величине зарядов на частицах атмосферных аэроколлоидов. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1947, II, № 4, с. 341-348.
6. Arendt, P., Kallman, H. Über den Mechanismus der Aufladung von Nebelteilchen. Zs. Phys., 1926, 35, Nr. 6, S. 421-441.
7. Hewitt, G.W. The charging of small particles for electrostatic precipitation. AIEE Trans., 1957, 76, No. 31, p. 300-306.
8. Liu, B.Y.H., Kapadia, A. Combined field and diffusion charging of aerosol particles in the continuum regime. J. Aerosol Sci., 1978, 9, No. 3, p. 227-242.

9. Pauthenier, M., Moreau-Hanot, M. La charge des particules sphériques dans un champ ionisé. J. de Phys. et le Radium, 1932, 3, No. 12, 590-613.
10. Pui, O.Y.H. Experimental study of diffusion charging of aerosols. Progress report. Particle Tech. Lab., University of Minnesota, Minnesota, 1973, publ.No. 289.
11. Rohman, H. Methode zur Messung der Grösse von Schwebeteilchen. Zs. Phys., 1923, 17, S. 253-265.
12. White, H.J. Particle charging in electrostatic precipitation. AIEE Trans., 1951, 70, p. 1186-1191.

#### ON DISCHARGING UNIPOLARLY CHARGED AEROSOL PARTICLES

M. Noppel, E. Tamm

#### S u m m a r y

The paper deals with changes in the charge of spherical aerosol particles having an initial charge. Particles have been exposed to unipolar gas ions in a homogeneous electric field. Formulas have been derived for rough calculations of the kinetics of changes in the charge in cases of field charging (formulas 5, 6, 7) and diffusion charging (equation 12, formula 13) mechanisms separately. The possibilities of accelerating the algorithm for a numerical solution of the general charging differential equation (14) have been discussed. It has been found that for rough calculations in the case of a high field intensity one can apply the field charging theory, and in the case of a low field intensity we can use the diffusion charging theory. In both cases the other charging mechanism can be ignored.

## ОБ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАССЕИВАНИИ АЭРОИОНОВ

Я.И. Сальм

Электростатическое рассеивание во многих случаях является процессом, определяющим характер изменения концентрации аэроионов во времени и в пространстве. Знание закономерностей рассеивания представляет интерес, например, при изучении зарядки аэрозольных частиц, при оценке искажений в спектрометрах аэроионов, при искусственной ионизации помещений и т.д.

Рассмотрим здесь однородно и униполярно ионизированный газ, в котором процесс ионизации прекратился. Происходит только процесс электростатического рассеивания за счет взаимного кулоновского отталкивания аэроионов.

В случае, когда аэроионы все одинаковой подвижности  $k$ , закономерность известна [1, 2], ее легко можно вывести. Обозначим плотность заряда аэроионов данной полярности  $q$ . Исходим из уравнения непрерывности (закона сохранения заряда):

$$\frac{dq}{dt} + q \operatorname{div} \vec{v} = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что дивергенция скорости аэроионов обусловлена только электрическим полем объемного заряда, а скорость аэроионов пропорциональна напряженности электрического поля  $\vec{E}$

$$\vec{v} = k\vec{E},$$

где  $k$  — подвижность аэроионов (постоянная величина), можем написать

$$\frac{dq}{dt} + qk \operatorname{div} \vec{E} = 0. \quad (2)$$

Однако по уравнениям Максвелла

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{q}{\epsilon}, \quad (3)$$

где  $\epsilon$  — электрическая постоянная (при нормальных условиях в газах  $\epsilon \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).



Итак, в случае одной единственной подвижности получим уравнение

$$\frac{d\varrho}{dt} + \frac{k}{\varepsilon} \varrho^2 = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) можно написать в виде

$$\varrho = \frac{\varrho_0}{\frac{\varrho_0 k t}{\varepsilon} + 1}, \quad (5)$$

где  $\varrho_0$  - начальная плотность заряда в момент  $t = 0$ .

Согласно формуле (5) плотность заряда уменьшается обратно пропорционально времени с характерным временем  $\varepsilon/\varrho_0 k$ .

Если мы имеем дело с множеством подвижностей, то задача гораздо сложнее. Множество подвижностей можно рассматривать как непрерывное или как дискретное. В непрерывном случае введем спектральную функцию распределения плотности заряда по подвижностям

$$\varrho(k) = \lim_{\Delta k \rightarrow 0} \frac{\varrho(k, k + \Delta k)}{\Delta k},$$

где  $\varrho(k, k + \Delta k)$  - частная плотность заряда в интервале подвижностей от  $k$  до  $k + \Delta k$ .

Размерность спектральной функции не совпадает с размерностью плотности заряда. Спектральная функция войдет в формулы (1) и (2) вместо  $\varrho$ , а в формуле (3)  $\varrho$  будет означать интегральную (суммарную) плотность заряда

$$\varrho = \int_0^{\infty} \varrho(k) dk.$$

Вместо формулы (4) получим

$$\frac{d\varrho(k)}{dt} + \frac{k}{\varepsilon} \varrho \cdot \varrho(k) = 0. \quad (6)$$

Решить уравнение (6) до сих пор полностью не удалось, однако возможно доказать существование определенного соотно-

шения между значениями  $g(k)$  при разных подвижностях  $k_1$ ,  $k_2$  и т.д. /3/. Перепишем уравнение (6) в виде

$$\frac{1}{k g(k)} \frac{dg(k)}{dt} = -\frac{g}{\varepsilon}$$

и далее в виде

$$\frac{d \ln [g(k)]^{\frac{1}{k}}}{dt} = -\frac{g}{\varepsilon} . \quad (7)$$

Поскольку правая половина уравнения (7) не зависит от  $k$ , то можно написать для любых фиксированных значений  $k_1$  и  $k_2$

$$\frac{d \ln [g(k_1)]^{\frac{1}{k_1}}}{dt} = \frac{d \ln [g(k_2)]^{\frac{1}{k_2}}}{dt} . \quad (8)$$

Проинтегрировав равенство (8), получим

$$\ln [g(k_1)]^{\frac{1}{k_1}} = \ln [g(k_2)]^{\frac{1}{k_2}} + \ln C$$

или

$$[g(k_1)]^{\frac{1}{k_1}} = C [g(k_2)]^{\frac{1}{k_2}} .$$

Постоянную интегрирования  $C$  можно определить через начальные значения  $g_0(k_1)$  и  $g_0(k_2)$  в момент  $t = 0$ . Получим

$$\frac{[g(k_1)]^{\frac{1}{k_1}}}{[g(k_2)]^{\frac{1}{k_2}}} = \frac{[g_0(k_1)]^{\frac{1}{k_1}}}{[g_0(k_2)]^{\frac{1}{k_2}}} \quad (9)$$

или

$$\frac{[g(k_1)]^{\frac{1}{k_1}}}{[g_0(k_1)]^{\frac{1}{k_1}}} = \frac{[g(k_2)]^{\frac{1}{k_2}}}{[g_0(k_2)]^{\frac{1}{k_2}}} . \quad (9')$$

Если рассматривать  $n$  дискретных значений подвижности  $k_1, k_2, \dots, k_n$  и обозначать соответствующие частные плотности заряда  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , то аналогично уравнению (6) получим систему уравнений

$$\frac{dg_i}{dt} + \frac{k_i}{\varepsilon} g \cdot g_i = 0, \quad (10)$$

где плотность заряда

$$g = \sum_{j=1}^n g_j.$$

Аналогичная система была приведена еще в работе /4/, однако ее решение до сих пор неизвестно. В дискретном случае также действительны соотношения (9) и (9'). Перепишем их в виде

$$\frac{g_i^{1/k_i}}{g_j^{1/k_j}} = \frac{g_{i0}^{1/k_i}}{g_{j0}^{1/k_j}} \quad (11)$$

и

$$\left( \frac{g_i}{g_{i0}} \right)^{1/k_i} = \left( \frac{g_j}{g_{j0}} \right)^{1/k_j}, \quad (11')$$

где индекс „0“ опять обозначает начальное значение, а индексы  $i$  и  $j$  могут принадлежать любым группам ионов.

Используя соотношение (11) или (11'), возможно систему (10) перевести в множество независимых уравнений с разделяющимися переменными

$$\frac{dg_i}{dt} + \frac{k_i}{\varepsilon} g_i \sum_{j=1}^n g_{j0} \left( \frac{g_i}{g_{i0}} \right)^{k_j/k_i} = 0.. \quad (12)$$

В принципе возможно решить каждое уравнение (12) отдельно, однако до сих пор решение удалось вести лишь до вида

$$\int \frac{dg_i}{g_i \sum_{j=1}^n g_{j0} \left( \frac{g_i}{g_{i0}} \right)^{k_j/k_i}} = - \frac{k_i}{\varepsilon} t + C. \quad (13)$$

Уравнение (I3) не удалось проинтегрировать окончательно даже в случае наличия двух групп ионов, но эта формула облегчает численный расчет рассеивания.

Постараемся решить систему (I0) в одном частном случае, когда имеются лишь две группы аэроионов, далеко разнесенные друг от друга по подвижности. Условно можно их назвать тяжелыми (с малой подвижностью  $k_T$ ) и легкими (с большой подвижностью  $k_L$ ). Плотности заряда обозначим соответственно  $g_T$  и  $g_L$ . В такой ситуации легкие ионы быстро рассеиваются, а тяжелые — медленно. Принимая плотность заряда тяжелых ионов  $g_T$  за постоянную, возможно интегрировать уравнение для легких ионов

$$\frac{dg_L}{dt} = -\frac{k_L}{\varepsilon} g_L (g_T + g_L).$$

Если  $g_T = \text{const.}$ , то в качестве решения получим

$$g_L = \frac{g_{L0}}{\left(1 + \frac{g_{L0}}{g_{T0}}\right) \exp\left(\frac{g_{T0} k_L t}{\varepsilon}\right) - \frac{g_{L0}}{g_{T0}}}, \quad (\text{I4})$$

где индекс „0“ обозначает начальные значения.

Плотность заряда  $g_L$  экспоненциально уменьшается во времени с характерным временем  $\varepsilon/g_{T0} k_L$ . При малых временах, если разложить экспоненциальную функцию в степенной ряд и ограничиться первыми двумя членами, получим формулу вида (5). При больших временах, сравнимых с характерным временем и больше, формула (I4) дает гораздо более быстрое уменьшение плотности заряда, чем (5).

В более ограниченном случае, когда  $g_{T0} \gg g_{L0}$ , формула (I4) дает чисто экспоненциальную зависимость, на что было указано ранее /1, 2/.

Ухудшения точности формулы (I4) можно ожидать по мере нарушения предположений о большой разности подвижностей  $k_T$  и  $k_L$ , а также о постоянстве плотности заряда тяжелых ионов. Разумеется, для приближенных расчетов группы легких и тяжелых ионов могут иметь конечную ширину и не очень далеко стоять друг от друга по подвижности. В таком случае подвижности  $k_T$  и  $k_L$  следует рассматривать как средние значения групп.

## Л и т е р а т у р а

1. Таммет Х.Ф. Воздействие объемного заряда в аспирационных счетчиках аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1963, вып. 140, с. 46-61.
2. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1967, вып. 195, 232 с.
3. Салым Я.И., Тамм Э.И. О роторных гидроионизаторах. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1963, вып. 140, с. 62-70.
4. Wolodkewitsch, N. Untersuchungen über die "elektrische Diffusion" der Ionen in Gasen unipolarer Beladung.- Ann. Physik, 1933, Bd. 16, S. 7-43.

## ON THE ELECTROSTATIC SCATTERING OF AIR IONS

J. Salm

### S u m m a r y

This paper deals with the electrostatic scattering of air ions in the case of unipolar ionization of gas. Differential equations are derived which describe scattering both at the continuous and at the discrete distribution of mobilities. The possibility for a partial solution of the equation is pointed out. This makes it easier to carry out the respective numerical calculations. In a special case when two air-ion groups are considered the mobilities of which differ greatly (large and small ions); the solution of Equation 14 is derived which expresses the dependence of the charge density of small ions on time.

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНЫХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Л.Ю. Виснапуу

Дальность действия нейтрализаторов обычных типов составляет всего лишь около  $0,1 \text{ м /I/}$ . Поэтому в тех случаях, когда нейтрализатор не может быть установлен вблизи нежелательных электростатических зарядов, возникают определенные трудности их нейтрализации. Усложняющими обстоятельствами являются объемное распределение зарядов, опасность образования искрового разряда и т.п. В таких случаях необходимы нейтрализаторы с увеличенной дальностью действия. К последним относятся струйные нейтрализаторы /2-4/, в которых заряженные частицы струей воздуха принудительно направляются в зону нейтрализуемых зарядов.

В данной работе приведены результаты сравнительной оценки эффективности струйных нейтрализаторов, основанных на ионизации воздуха и электризации распыленной воды.

В качестве нейтрализаторов использовали аэроионизатор, имеющий центральное коронирующее острие и периферийное кольцевое сопло для воздуха, обтекающего острие /5/, и генератор электроаэрозоля, представляющий собой пневматический распылитель с центральным индуцирующим электродом и периферийными кольцевыми соплами для воздуха и воды /6/. Генератором электроаэрозоля распыливали водопроводную воду с массовым расходом  $0,08 \text{ г/с}$ . Массовый расход воздуха как аэроионизатора, так и генератора электроаэрозоля выбрали равным  $0,5 \text{ г/с}$ . При этом скорость потока воздуха на оси струи на расстоянии  $0,5 \text{ м}$  от начального сечения в обоих случаях составляла  $1,5 \text{ м/с}$ . Тем самым создавали примерно одинаковые потоки воздуха, удаляющие заряженные частицы от аэроионизатора и генератора электроаэрозоля. Кроме того, при аэроионизаторе применяли также режим, в котором воздух не подавали.

Общая схема измерения тока нейтрализации представлена на рис. 1. Нейтрализатор I и подключенные к нему резервуар 2 воды, расходомер 3 воздуха и источник 5 напряжения изолировали от земли и заземляли через микроамперметр 4. Последний позволял измерять ток конвекции зарядов, покидающих нейтрализатор I. Напряжения, подаваемые на коронирующий и индукци-

душий электроды, выбрали такими, чтобы ток конвекции зарядов во всех случаях при отсутствии тел ближе 2 м перед нейтрализатором равнялся 0,4 мкА.

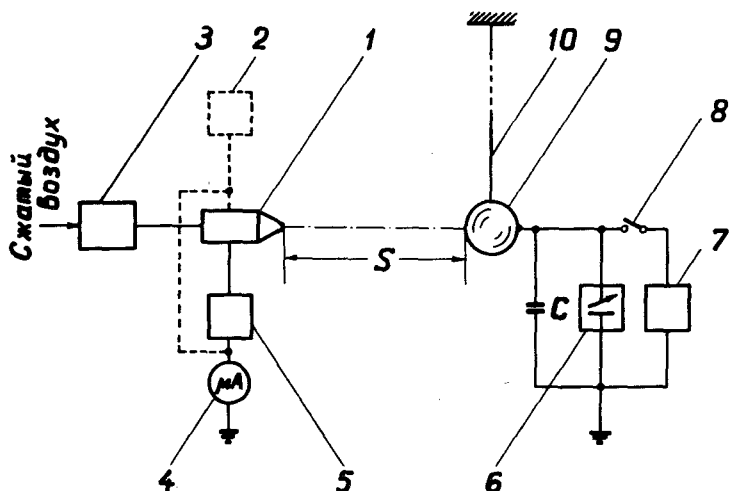


Рис. 1. Схема измерения тока нейтрализации.

Объектом, на котором изучали нейтрализацию статического электричества, служил металлический шар 9 диаметром 21 см, подвешенный на трех капроновых нитях 10 к потолку помещения. В радиусе 1 м от шара отсутствовали посторонние предметы, чтобы электрическое поле шара не было сильно искажено. Посредством отвода шар был соединен с измерительным устройством, состоящим из статического вольтметра 6, добавочного конденсатора С, источника 7 высокого напряжения и контакта 8. Электрическая емкость шара с соединенными с ним элементами измерительного устройства составляла 220 пФ.

При измерениях тока нейтрализации нейтрализатор I устанавливали на определенном расстоянии  $S$  от шара 9. Поток заряженных частиц направляли в сторону шара, заряженного зарядом противоположного знака. Относительная влажность и температура воздуха при нейтрализации заряда составляли при работе аэроионизатора соответственно 36% и 20°C, а при работе генератора электроаэрозоля 40% и 21°C.

Для оценки эффективности нейтрализаторов, генерирующих нейтрализующие заряды, введена безразмерная величина

$$\eta = J(s, u) / J(s = \infty), \quad (1)$$

где  $J(s, u)$  – сила тока нейтрализации заряда тела, расположенного от нейтрализатора на расстоянии  $s$  и имеющего потенциал  $u$ ;

$J(s = \infty)$  – сила тока нейтрализатора при отсутствии перед ним тела с нейтрализуемым зарядом, которая в наших опытах составляла 0,4 мкА.

При каждом режиме работы нейтрализатора и различных стадиях нейтрализации зарядов силу тока нейтрализации определяют как произведение электрической емкости шара с измерительным устройством на скорость изменения его потенциала:

$$J(s, u) = -C(du/dt). \quad (2)$$

На рис. 2 показаны зависимости эффективности различных нейтрализаторов от расстояния между нейтрализатором и заряженным телом при его фиксированном потенциале (а) и от потенциала тела при фиксированном расстоянии между нейтрализатором и телом (б).

Сравнивая графики эффективности различных нейтрализаторов, можно сделать следующие выводы:

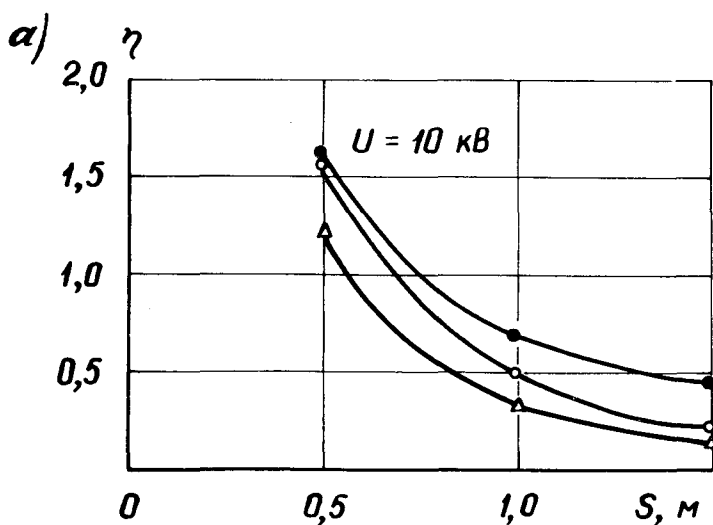
- поток воздуха, направляемый от источника заряженных частиц к объекту статического электричества, способствует увеличению дальности действия и эффективности нейтрализации заряда как аэроионами, так и электроаэрозолем;

- с увеличением расстояния между нейтрализатором и объектом статического электричества эффективность нейтрализации электроаэрозолем уменьшается относительно медленнее, чем эффективность нейтрализации того же заряда аэроионами;

- при расстояниях более 1 м с падением потенциала объекта статического электричества эффективность нейтрализации электроаэрозолем уменьшается относительно медленнее, чем эффективность нейтрализации аэроионами.

Газные эффективности нейтрализации электроаэрозолем и аэроионами при больших расстояниях объясняются разными средними значениями электрической подвижности и продолжительности жизни соответствующих заряженных частиц.





Нейтрализаторы: ● - генератор электроаэрозоля,  
○ - аэроионизатор с потоком воздуха,  
△ - аэроионизатор без потока воздуха

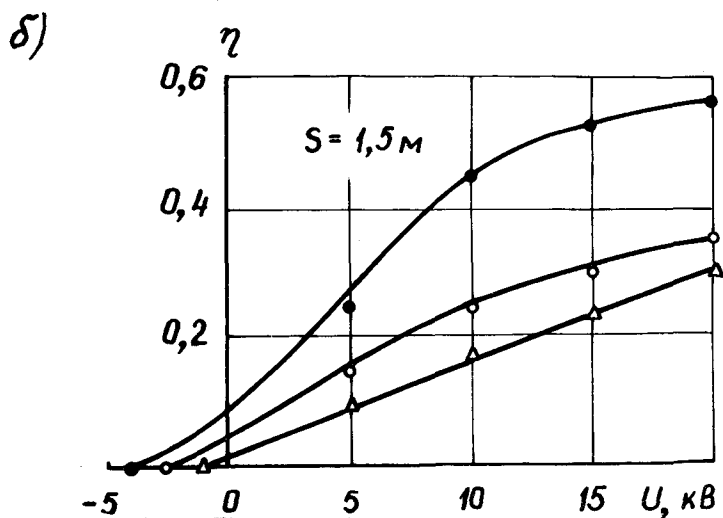


Рис. 2. Зависимости эффективности различных нейтрализаторов от расстояния между нейтрализатором и заряженным телом (а) и от потенциала тела (б).

## Л и т е р а т у р а

1. Лебель Е., Шуман В., Лохмюллер О., Шидевиц Х., Фридель Х., Кукс Ф. Статическое электричество при переработке химических волокон. М., "Легкая индустрия", 1966.
2. Гейфтер Н.Л., Журавлев Б.С. Исследование пневмоэлектрического нейтрализатора статического электричества. - "Промышленная энергетика", 1969, № 4, с. 36-40.
3. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю., Ютс Э.Ю. Коронный нейтрализатор со сквозным потоком воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 240, Тарту, 1970, с. 243-251.
4. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю., Тетсов Э.А. Сравнительное исследование эффективности нейтрализации электростатических зарядов посредством генераторов аэроионов и электрически заряженного аэрозоля. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 240, Тарту, 1970, с. 262-270.
5. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. Изучение возможности использования пневматических распылителей для электрической зарядки распыливаемых жидкостей.-Сб.: Окраска изделий в электрическом поле. М., "химия", 1966, с.74-76.
6. Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю. О создании электрически заряженных аэрозолей в камерах. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, вып. 240, Тарту, 1970, с. 298-301.

### ON THE EFFICIENCY OF JET NEUTRALIZERS OF STATIC ELECTRICITY

L. Visnapuu

#### S u m m a r y

The paper presents experimental comparative data on the efficiency of various jet neutralizers. The objects of study were a pneumatic sprayer with an inductive electrode and an air ionizer with a corona point. It appeared from the results of experiments that if at distances over one metre both the pneumatic sprayer and the air ionizer consume air and convection current in equal amounts, the charged aerosol generator is more efficient than the air ionizer in the neutralization of static charges.

## ИНДИКАТОР ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛАБОСВЕЯЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

М.А. Айнто, В.И. Жаворонков, А.А. Халыасте

За последнее время арсенал технических средств, используемых в естественных науках, пополнился новым классом приборов - электронно-оптическими преобразователями (ЭОП), которые превратились сейчас в весьма универсальный и важный инструмент исследований в различных областях науки и техники /1/.

Разработанный индикатор предназначен для визуализации пространственной картины слабоосветящегося процесса, сопровождающегося излучением в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Он может быть использован, например, при изучении оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых приборов, при исследовании процесса развития электронных лавин и стримеров в газовом разряде, для люминесцентных и аэрозольных исследований и т.д.

Полная схема индикатора представлена на рис. 1. Она состоит из оптической схемы регистрации и принципиальной схемы высоковольтного преобразователя напряжения. Индикатор выполнен на основе трехкамерного ЭОП 4 типа У-72М с электростатической фокусировкой электронного изображения /2/. Используемый ЭОП имеет многощелочной входной фотокатод 3 и люминофорный выходной экран 5 желто-зеленого свечения /2/. Изображение излучающего объекта 1 проецируется линзовой системой 2 (например, объективом "МИР-1") на фотокатод ЭОП с необходимым масштабом. Усиленное по яркости и преобразованное в видимую область спектра изображение регистрируется с выходного экрана фотокамеры 6 (например, "Зенит-3М") или наблюдается визуально.

Питание индикатора (см. рис. 1) осуществляется от высоковольтного преобразователя с регулируемым выходным напряжением. Преобразователь построен по схеме двухтактного автогенератора с общим коллектором на транзисторах ТЗ-Т4 (КТ 803А). Частота преобразования около 3 кГц. Высоковольтный трансформатор Тр1 собран на II-образном сердечнике НМ 2000 от телевизионного строчного трансформатора ТВС 110 Л. Высоковольтная обмотка шестисекционная, пропитанная парафином. Напряжение

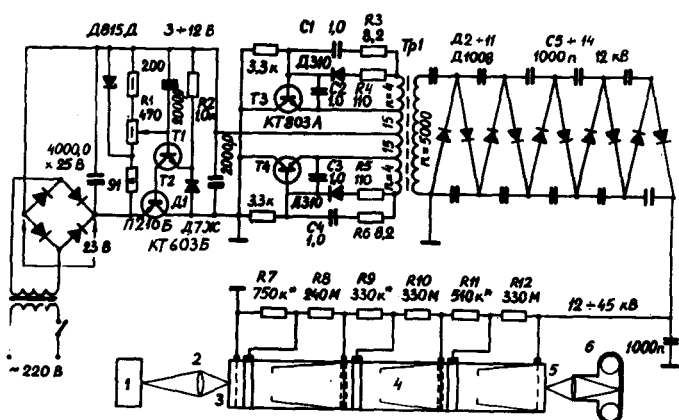


Рис. 1. Принципиальная схема включения индикатора.

1 - исследуемый объект, 2 - проекционная система, 3 - входной фотокатод ЭОП, 4 - электронно-оптический преобразователь, 5 - выходной люминесцентный экран, 6 - регистрирующая фотокамера.

на вторичной обмотке 5000 В. Подборкой резисторов  $R_3$ – $R_6$  и конденсаторов  $C_1$ – $C_4$  обеспечивается устойчивая и экономичная работа схемы. Питается преобразователь от стабилизированного выпрямителя на транзисторах  $T_1$ – $T_2$ , который имеет коэффициент стабилизации 100 /3/ и пульсацию менее 10 мВ. Цепочка  $R_2$ – $D_1$  обеспечивает защиту схемы от короткого замыкания. Регулировка выходного напряжения стабилизатора осуществляется потенциометром  $R_1$  в пределах 3–12 В, что дает изменение высоковольтного напряжения в пределах 12–45 кВ. При этом максимальный постоянный ток, потребляемый преобразователем напряжения, составляет 0,4 А, а потребляемая от сети мощность 15 Вт. Транзисторы  $T_2$ – $T_4$  имеют заземленный коллекторный вывод, что позволяет для отвода тепла монтировать их непосредственно на шасси прибора.

Получение соответствующего ускоряющего напряжения на каждой камере ЭОП достигается с помощью высоковольтного делителя, составленного из резисторов  $R_8$ ,  $R_{10}$  и  $R_{12}$  (типа КЭВ–5). Фокусировка изображения на экране индикатора обеспе-

чивается установкой определенных потенциалов на подфокусирующих электродах относительно катодов в каждой камере с помощью резисторов K7, K9 и R11. Электронно-оптический преобразователь и высоковольтный делитель следует экранировать от переменных электрических и магнитных полей, возникающих в преобразователе напряжения. При сборке особое внимание необходимо уделять на сглаживание острых выступов для предотвращения короны высоковольтной части монтажа. Габаритные размеры прибора без фотоаппарата  $65 \times 29 \times 12,5$  см<sup>3</sup>, вес 10 кг. Предложенная схема питания ЭОП обеспечивает более устойчивую работу индикатора, а также позволяет регулированием напряжения изменять коэффициент усиления яркости изображения при сохранении необходимой разрешающей способности и качества изображения.

Одной из возможных иллюстраций применения созданного индикатора является использование его при исследовании излучающего р-п перехода кремниевого лавинного фотодиода. На рис. 2а и б представлены фотографии, показывающие характер

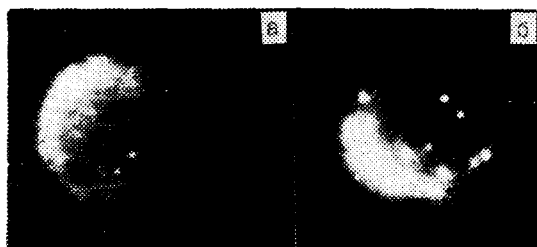


Рис. 2. Свечение р-п перехода кремниевого фотодиода, диаметр перехода 500 мкм. а)  $U_{обр} = -45$  В,  $U_{\sim} = 6$  В, б)  $U_{обр} = -50$  В,  $U_{\sim} = 9$  В.

свечения и пространственного распределения микроплазмы при динамическом пробое р-п перехода диода при различных режимах работы.

Прибор был использован также при исследовании газового разряда. На рис. 3 представлена фотография одиночного разрядного импульса положительной короны с острия - стримера - в 4-х сантиметровой промежутке острие - плоскость (диаметр острия 3 мм). Напряжение между электродами 13,6 кВ. Время

свечения любого участка ветвей стримера не превышает 10 нс. На рис. 4 зафиксировано свечение жала паяльника при температуре нагрева  $400^{\circ}\text{C}$ , что соответствует ближней инфракрасной области спектра излучения.

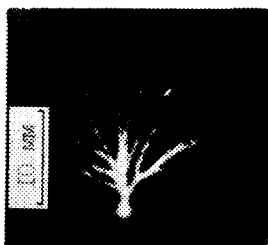


Рис. 3. Фотография оди-  
ночного разряд-  
ного импульса.

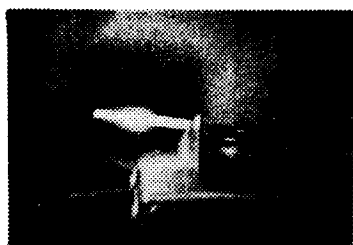


Рис. 4. Свечение жала  
паяльника при  
 $t = 400^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, описанный индикатор может быть весьма полезным инструментом при оптической регистрации различного рода свечений и найти применение в исследовательской практике. Созданный индикатор прост по схемному решению и конструктивному исполнению. При испытаниях его показано, что он позволяет на три порядка увеличить яркость исследуемых объектов. Внешний вид прибора показан на рис. 5.

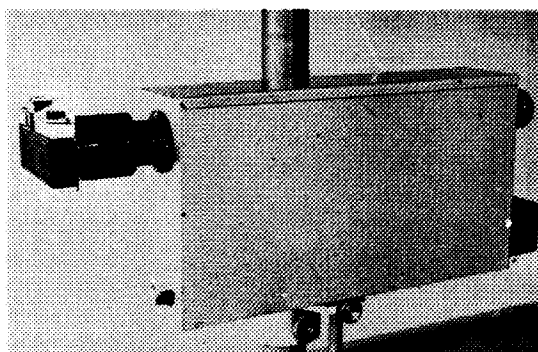


Рис. 5. Внешний вид индикатора.

В заключении авторы выражают благодарность ст. инженеру ТТУ Т. Асу за монтаж и налаживание источника питания.

### Л и т е р а т у р а

1. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях, 1972, М., "Наука", 41.
2. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотозлектронные приборы, 1976, М., "Энергия", 276.
3. Клеев Ю., Абашев С. - Радио, 1975, № 2, 23.

### AN INDICATOR FOR OPTICAL INVESTIGATIONS OF WEAKLY LUMINOUS OBJECTS

M. Aints, V. Zhavoronkov, A. Haljaste

### S u m m a r y

The paper presents the description of an electron-optical indicator built on the basis of a three-cascade electron-optical image intensifier. The indicator enables one to increase the luminosity of the image by three orders of magnitude in the range of wavelenghts of 400 - 900 nm. The possibilities of using the indicator in research work in the field of experimental physics are shown.

# ОСНОВАНИЕ, СТРУКТУРА И ОБЗОР ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОБЛЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ

П.К. Проллер

## I. Основание лаборатории и предшествующий ему период

Проблемная лаборатория аэроионизации и электроаэрозолей (ПЛАЭ) Тартуского государственного университета (ТГУ) была основана при кафедре общей физики ТГУ постановлением Совета Министров ЭССР № 431-к от 31 марта 1964 г. Инициатором ее создания был доц. к.ф.-м.н. Я. Рейнет.

Исследование изменений концентрации атмосферных молионов в г. Тарту начал в 1937 г. А. Митт /1/. Более обширное и основательное исследование атмосферной ионизации и искусственной ионизации началось в 1951 г. /2/ с помощью спектрометра аэроионов, сконструированного Я. Рейнетом /6/. Этот спектрометр позволял измерять концентрации ионов различных групп по подвижности, начиная от молионов и кончая ультратяжелыми ионами.

Исследования биологического действия аэроионов и электроаэрозолей на организм человека и применение в клиниках в терапевтических целях генераторов, сконструированных сотрудниками кафедры общей физики ТГУ, начали в 1954 г. проф. Э. Сийрде и в 1959 г. проф. Э. Раудам. Это было важным стимулом конструирования новых электроаэрозольных генераторов в ТГУ и их применения в медицине, промышленности и народном хозяйстве.

Первые хозяйственные на выполнение научно-исследовательских работ были заключены в 1957 г. с Институтом физиологии им. И.П. Павлова АН СССР и в 1958 г. с Пермским научно-исследовательским институтом угля на разработку аппаратуры для определения электрических зарядов пыли в шахтах. Особенно обширной была исследовательская работа в 1961-65 гг. совместно с Институтом биофизики АН СССР.

По данным мировой литературы, самые обширные измерения концентрации легких и тяжелых ионов проводила в г. Тарту в 1951 г. Я. Рейнет и Х. Марран с визуальной регистрацией отсчетов /2, с. 41-138/ и в 1960-63 гг. П. Проллер с автоматической фоторегистрацией отсчетов /6, с. 32-139/. Измерения



показали, что концентрация ионов в г. Тарту за 10 лет изменялась мало. Измерения концентрации ионов позволяют оценивать степень чистоты и загрязненности воздуха. Проведенные на ЭВМ корреляционные вычисления показали наличие связей между концентрациями ионов и метеорологическими элементами /6, с. 82-94/.

Создание ПЛАЭ в 1964 г. было обосновано успешной научной и конструкторской работой группы физиков кафедры общей физики в области атмосферной ионизации и электроаэрозолей. В эту группу входили Я. Рейнет (руководитель коллектива), П. Прюллер, О. Сакс, Я. Салым, Э. Тамм, Х. Таммет и Л. Виснапуу, которым в 1967 г. была присуждена премия Советской Эстонии за достижения в области науки и техники.

## 2. Структура и штатный состав ПЛАЭ

Решительным шагом на пути повышения эффективности работы ПЛАЭ явилось распределение штатов лаборатории по секторам и назначение научных руководителей секторов.

С 1977 г. ПЛАЭ состоит из пяти секторов (исследовательских групп):

1. Сектор спектрометрии аэроионов. Руков. с.преп.к.ф.-м. наук Я. Салым.
2. Сектор аэрозолей. Руков. доц. к.ф.-м.н. Э. Тамм.
3. Сектор электрометрии. Руков. с.преп. О. Сакс.
4. Сектор газового разряда. Руков. доц.к.ф.-м.н. К. Куду.
5. Сектор геофизических наблюдений. Руков. доц.к.ф.-м.н. Я. Рейнет.

В 1978 г. в составе ПЛАЭ числилось 19 штатных единиц: 1 зав. лаб., 5 руков. сектора, 2 с.н.с., 2 м.н.с., 7 с.инж., 1 инж. и 1 преп., из них 2 имеют научную степень к.ф.-м.н. 1 - ученое звание доцента и 1 - ученое звание с.н.с. Состав хозяйственных сотрудников следующий: 7 с.н.с., 3 м.н.с., 15 с. инж., 5 инж., 1 с. лаб., 6 преп., 3 токаря, 3 слесаря - всего 43 работника, из них 2 имеют научную степень к.ф.-м.н. и 1 - ученое звание доцента. По совместительству на 0,5 нагрузки в ПЛАЭ работают 9 с.н.с., 4 м.н.с., 1 с.инж., 5 инж., 2 с. лаб. и 2 слесаря - всего 23 работника. Из них 5 имеют ученую степень к.ф.-м.н. и 1 - к.т.н.

Научным руководителем ПЛАЭ в 1964-74 гг. был доц. к. ф.-м.н. Я. Рейнет, а с 1974 г. доц. к.ф.-м.н. К. Куду. Заве-

дующим ПЛАЭ в 1971-75 гг. являлся доц. Я. Рейнет, а с 1975 года с.н.с. к.ф.-м.н. Л. Виснапуу.

В социалистическом соревновании ПЛАЭ была в 1977 и 1978 гг. на первом месте среди других проблемных лабораторий ТТУ.

### 3. Основные научные достижения ПЛАЭ

Основными научными достижениями ПЛАЭ следует считать:

1. Создание и развитие общей теории аспирационного метода спектрометрии подвижности аэроионов и ряда уникальных конструкций спектрометров аэроионов.

2. Экспериментальное подтверждение линейчатости структуры спектра подвижностей легких аэроионов, открытие чувствительности этой структуры к некоторым микропримесям в атмосфере и разработка специального спектрометра легких ионов для химического анализа (пока качественного) этих примесей (порог чувствительности ориентировочно  $1 \text{ мкг/м}^3$ ).

3. Создание основ расчета пневматических распылителей с индукционной зарядкой частиц и разработка серии соответствующих генераторов электроаэрозолей для медицинской и ветеринарной практики, а также для применения в промышленности.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование аналитической зарядки аэрозольных частиц с целью создания основ расчета зарядников для аспирационных электрогранулометров аэрозольных частиц.

5. Усовершенствование теории траекторной спектрометрии аэрозольных частиц и создание широкополосного траекторного спектрометра с полуавтоматическим координатометром для введения информации в ЭВМ.

6. Разработка ряда коронных и аэрозольных нейтрализаторов статического электричества.

7. Создание теории собственных помех преобразователей с динамическим конденсатором. Экспериментально доказано, что при нормальном атмосферном давлении паразитные ионизационные токи можно уменьшить до  $10^{-18} \text{ А}$ , обеспечив таким образом порог чувствительности по току  $10^{-18} \text{ А}$ .

8. Усовершенствование методов расчета электрометрических устройств и разработка электрометров, порог чувствительности которых по току  $10^{-17} \text{ А}$  и по заряду  $10^{-16} \text{ Кл}$ .

9. Разработка калиброванных ионизационных источников то-

ка в пределах  $10^{-15}$  -  $10^{-8}$  А для метрологического обеспечения электрометрической аппаратуры.

10. Экспериментальное доказательство того, что при частотах до нескольких десятков мегагерц одноэлектродный высокочастотный разряд зажигается стримером или импульсом Тричелла, возникающего во время одного из полупериодов. Появлению этих разрядов предшествует предразрядная стадия совместно с т.н. предразрядными импульсами, в течение которых создаются предпосылки для возникновения высокочастотного разряда при значительно более низких напряжениях, чем это происходит при низкочастотном или постоянном напряжении. Доказано также существование последовательности первичный-вторичный стример в коротком разрядном промежутке на пороге положительной короны.

11. Осуществление обширных и фундаментальных исследований ионизации атмосферы в г. Тарту, необходимых для выяснения изменений загрязненности атмосферы, а также для определения связей концентрации ионов с метеорологическими элементами.

12. Исследование ионизации воздуха в различных природных условиях и в помещениях ряда промышленных предприятий.

13. Разработка специальных установок для экономного сжигания взрывоопасных промышленных отходов и нефтепродуктов с содержанием воды.

14. Разработка фильтров для очистки трюмных вод рыболовных кораблей от примесей масла.

#### 4. Данные, характеризующие научную работу ИЛАЭ

Тематика научной работы ИЛАЭ включена в план научно-технической проблематики ТТУ и согласована с планами Института физики АН СССР и Главной геофизической обсерваторией в Ленинграде.

По тематике лаборатории в 1955-77 гг. опубликовано 538 научных работ, из них до основания ИЛАЭ в 1964 г. 139 работ. В Эстонской ССР опубликовано 275, в других союзных республиках - 199 и за рубежом - 64 работы. Авторами или соавторами более одной трети трудов ИЛАЭ (189) являются медики. В 1970-77 гг. напечатано 265 работ, из которых в СССР за пределами Советской Эстонии было опубликовано 72 и за рубежом - 49 работ. Основная часть работ напечатана в Ученых записках ТТУ

/I-II/. В Тарту были также опубликованы сборник по материалам всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы электроаэрозолей" /12/, 2 монографии (К. Куду /14/ и Х. Таммет /22; 25/), обзор исследований атмосферного электричества в Эстонской ССР в 1946-77 гг. (П. Прюллер) /13, с. 69-80/, а также обзор основания и деятельности ПЛАЭ за 1964-77 гг., доложенный 21 ноября 1977 г. в Тарту на II конференции по истории науки и техники прибалтийских республик (П. Прюллер) /16/.

По научной тематике ПЛАЭ сотрудниками ТГУ защищено две диссертации на соискание ученой степени доктора мед. наук (Э. Сийрде /19/ и Э. Раудам /21/), семь диссертаций на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук (Я. Рейнет, К. Куду, Х. Таммет, П. Прюллер, Я. Салым, Э. Тамм, Л. Виснапуу), одна - канд. технических наук (М. Фишер) и одна - канд. мед. наук (А. Йентс).

Физиками и медиками ТГУ в 1955-77 гг. по тематике ПЛАЭ были представлены доклады и опубликованы тезисы на 113 научных конгрессах и конференциях, из них 88 в СССР и 25 на следующих международных конгрессах: Париж 1961, По (Франция) 1963, Копенгаген 1965, Амстердам 1966, Вена 1967 и 1973, Бухарест 1969, Монтрё 1969, Вашингтон 1971, Москва 1971, Оксфорд 1971, Лондон 1972, Будапешт 1972, Нордвик (Голландия) 1972, Прага 1973, Бад Салдунген 1974, Вильнюс 1974, Бангор (Великобритания) 1974, Эйндховен 1975, Гренобль 1975, Суонси (Великобритания) 1976, Берлин 1977, Токио 1977, Алкона (Италия) 1977 и Варшава 1977.

Работники ПЛАЭ имеют по состоянию на 1 января 1979 г. 58 изобретений, на которые Государственным Комитетом при СМ СССР по делам изобретений и открытий выданы авторские свидетельства. Тематически эти изобретения распределяются следующим образом: генераторы электроаэрозолей - 20, счётчики аэроионов - 11, аэроионизаторы - 3, установки для электроокраски - 4, нейтрализаторы статического электричества - 4, остальные 16. Среди других сотрудников на первом месте Я. Рейнет, на счету которого имеется 27 авторских свидетельств. В 1974 г. ему присвоено почетное звание заслуженного изобретателя ЭССР.

По имеющимся данным в 1964-76 гг. сотрудники ПЛАЭ были в научной переписке с 756 партнерами из 156 различных городов (таблица I).

Т а б л и ц а    I

Партнеры сотрудников ИЛАЭ по научной переписке

Страны	Ч и с л о	
	городов	партнеров
СССР	106	674
народно-демократические	17	38
капиталистические	33	44
Итого	156	756

Наиболее активную переписку с зарубежными партнерами ведет доц. Я. Рейнет. Важным результатом этой переписки является получение иностранной научной литературы по специальности.

Свидетельством всесоюзного и международного признания ИЛАЭ является избрание Я. Рейнета членом двух научно-технических советов ГКНТ СМ СССР, Международного общества биометеорологии и почетным членом Института медицинской климатологии США. Членом одного научно-технического совета ГКНТ является заведующий ИЛАЭ Л. Виснапуу. Доц. К. Куду является членом научно-технического совета по физике плазмы Минвуза СССР. Руководитель сектора электрометрии О. Сакс является членом Совета специалистов по электрометрии при ленинградском отделении НТО. Бывший сотрудник ИЛАЭ, доц. Таллинского пед. ин-та х. Таммет, научная работа которого тесно связана с тематикой ИЛАЭ, является членом международной комиссии по атмосферному электричеству.

5. Аппараты, сконструированные сотрудниками ИЛАЭ, их серийное производство, экспонирование на выставках и экономический эффект

1. Генератор электроаэрозолей для индивидуальной ингаляции ГЭИ-I создает электроаэрозоли для индивидуального лечения ожогов при различных заболеваниях дыхательных путей. Применяется в физиотерапевтических ожоговых и хирургических отделениях лечебниц. Ингалятор выпускается серийно Харьковским заводом "Точмедприбор". В 1975-77 гг. таких ингаляторов изготовлено 6300 экземпляров. Экономический эффект от использования этих генераторов составляет около 2 млн. руб. /с. с. 231-246/.

2. Генератор электроаэрозолей для групповой ингаляции ГЭГ-2 создает электроаэрозоли для группового лечения и профилактики различных заболеваний. Применяется в физиотерапевтических отделениях и ингаляториях. Генератор выпускается серийно Харьковским заводом "Точмедприбор". В 1975-77 гг. их изготовлено 260 штук. Полученный экономический эффект составляет 160 тыс. руб. /9, с. 104-111/.

3. Устройство для групповой вакцинации животных и птиц создает из жидкой вакцины аэрозоль, что позволяет осуществлять групповую вакцинацию животных и птиц. Десять экземпляров этой установки, изготовленных в ТПУ, применяются на сельскохозяйственных предприятиях РСФСР, Литовской и Эстонской ССР. В 1973-77 гг. достигнутый экономический эффект составлял 500 тыс. руб. /10, с. 147-153; 11, с. 91-98/.

4. Распылитель с индуцирующим электродом предназначен для получения электроаэрозоля из электропроводящей жидкости с целью дезинфекции воздуха и поверхностей в помещениях для птиц и скота или для нейтрализации электростатических зарядов в текстильной и химической промышленности. Может быть использован при создании искусственного климата. Применяется в животноводческих и птицеводческих хозяйствах ЭССР, во ВНИИ ветеринарной санитарии. Внедряется на Ивановских и Пермских текстильных комбинатах и на заводах пластмассовых изделий. В ТПУ их изготовлено 30 экземпляров. Экономический эффект за 1974-77 гг. составляет 100 тыс. руб.

5. Электрометрический нуль-индикатор для измерения сопротивлений. Прибор повышает точность и уменьшает время измерений. Экономический эффект от его использования в 1976 году на Кишиневском заводе "Микропровод" составлял 151,5 тыс. руб.

6. Динамические электрометры предназначены для измерения токов силой  $10^{-18}$  ...  $10^{-5}$  А и постоянного напряжения  $10^{-5}$  ... 3В источников с большим внутренним сопротивлением. Эти электрометры широко применяются в газовой хроматографии, в химической и полупроводниковой физике, дозиметрии и т.д. /18/. Серийно выпускаются динамические конденсаторы ДК-60 на Таллинском заводе контрольной аппаратуры, ДК-62 и ДК-64 в Дзержинском филиале ОКБ автоматики, виброконтактные преобразователи ВМ на заводе (эстонской сельскохозяйственной электронной аппаратуры "Эстрон".

7. Электроаэрозольный генератор ГЭИД, применяемый с респиратором, т.е. аппаратом искусственного дыхания в реанима-

ционном центре нейрохирургического отделения Тартуской клинической больницы. Опытная партия генератора изготавливается на Опытном заводе ВНИИ медицинского приборостроения.

8. Счетчики аэроионов предназначены для измерения концентраций аэроионов в широком диапазоне подвижностей /9, с. 24-29; II, с. 52-56/.

Аппараты, сконструированные коллективом ПЛАЭ, демонстрировались с 1970 по 1977 гг. на 43 выставках. На ВДНХ СССР они экспонировались II раз (ТТУ был награжден шестью дипломами, а авторы - двумя почетными дипломами и 26 медалями), на ВДНХ ЭССР - 3 раза (награжден двумя дипломами) и за границей на 8 выставках: в Загребе в 1971 г., Лейпциге в 1973 г., Вене в 1974 г. и 1976 г., Пловдиве в 1975 г., Познани в 1976 г., Измире в 1977 г. и в Гренобле в 1977 г. Больше всего на выставках экспонировались генераторы электроаэрозолей на I7, счетчики на I4, динамические электрометры на 7 и установка для вакцинации на 6 выставках.

В таблице 2 приведены суммарные данные по экономическому эффекту от использования аппаратов, разработанных в ПЛАЭ, по отдельным годам.

Т а б л и ц а 2  
Экономический эффект, полученный от использования  
аппаратов, разработанных в ПЛАЭ, в 1973-77 гг.

Г о д	1973	1974	1975	1976	1977	Всего
Экономический эффект, тыс. руб.	145,0	204,0	205,0	776,5	1652,5	2983,0

#### 6. Выполнение хозяйственных работ

Объем хозяйственных работ, выполненных в ПЛАЭ, составлял в 1974 г. 172 тыс., в 1975 г. - 216 тыс., в 1976 г. - 253 тыс. и в 1977 г. - 297 тыс. руб.

Заключение договоров началось уже в 1956 г. и с тех пор их заключено и выполнено более 150. Среди заказчиков можно отметить Физико-химический ин-т им. Л. Карпова, Ин-т экспериментальной метеорологии, Главную геофизическую обсерваторию им. А. Воейкова, Ин-т физики АН Лит. ССР и др. Наибольшее число заказов было на изготовление счетчиков аэроионов и генераторов электроаэрозолей, а с 1974 г. и на усилители с

динамическим конденсатором и на электрометрические нуль-индикаторы.

В 1964-77 гг. ПЛАЗ выполнила 155 хозяйственных работ (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Распределение заказчиков хозяйственных работ по республикам в 1964-1977 гг.

Союзная республика, город	Число
Эстонская ССР	37
Литовская и Латвийская ССР	15
Москва	28
Ленинград	20
другие республики	55
Всего	155

Из стран народной демократии было 3 заказчика. Заказчики по учреждениям СССР:

1. Научно-исследовательские институты и высшие учебные заведения 92, из них медицинских, курортологических и гигиенических - 17, горных, электротехнических и по обработке металлов - 17, сельскохозяйственных и ветеринарных - 17, физических и химических - 11, университетов - 9, политехнических - 8 и т.д.; 2. Специализированные государственные предприятия - 23; 3. Заводы, конструкторские бюро и промышленные предприятия - 21; 4. Колхозы и совхозы - 8; 5. Министерства и коммунальные учреждения - 6; 6. Медицинские учреждения - 3; 7. Обсерватории - 2. Всего 155 учреждений.

По тематике заказы распределяются следующим образом: изготовление счетчиков аэроионов - 64, динамических электрометров - 19, установок для очистки сточных вод и устройств для сжигания водосодержащих остатков нефти - 18, усилителей - 9, генераторов электроаэрозолей - 8, исследований по ионизации воздуха - 7 и т.д..

Хозяйственными работами руководили Я. Рейнет - 60, Р. Матизен - 37, О. Сакс - 23, М. Ансо - 10, Э. Тамм - 8, Я. Салым - 7, Л. Виснапу - 3, Х. Таммет - 3, К. Куду - 1, У. Мельдер - 1, Р. Пиквер - 1, А. Савихин - 1 раз.



## 7. Сотрудничество ИИАЭ с кафедрами медицинского факультета ТГУ

Медики ТГУ уже в 1954 г. приступили к исследованиям биологического действия аэроионов и электроаэрозолей. Медиками или физиками в сотрудничестве с медиками в 1957-77 гг. опубликованы 189 научных работ и защищено 2 докторских и 1 кандидатская диссертации. Одним из центров соответствующих исследований стала кафедра оториноларингологии ТГУ с соответствующим отделением Тартуской клинической больницы под руководством проф. Э. Сийрде, а другим - кафедра неврологии ТГУ с неврологическим и нейрохирургическим отделением и реанимационным центром Тартуской клинической больницы под руководством проф. Э. Раудам. Заведующий кафедрой пропедевтики внутренних болезней проф. Я. Рийв и доц. кафедры общей физики П. Прюллер изучали в 1960-63 гг. ионизацию атмосферы в гигиеническом аспекте и связь метеорологических элементов и типов погоды с заболеваниями и смертностью в г. Тарту /17/.

В настоящее время аэроионо- и электроаэрозольтерапия изменилась в пользу электроаэрозольтерапии.

В отделении оториноларингологии Тартуской клинической больницы изучали биологическое действие аэроионов и электроаэрозолей на человеческий организм и применяли их в терапевтических целях проф. Э. Сийрде, доц. С. Сибуль и доц. А. Йентс /7, с. II0-II7, с. II8-123; 20/. Э. Сийрде показал, что 1) под влиянием отрицательных гидроионов увеличивается амплитуда биений изолированного сердца лягушки и возрастает активность мерцательного эпителия изолированного пищевода лягушки, положительные гидроионы оказывают противоположное влияние, 2) при ингаляции отрицательных электроаэрозолей понижается артериальное давление и возрастает содержание оксигемоглобина в человеческой крови.

А. Йентс отмечает при применении метода люминесценции, что осаждение электроаэрозоля флуоресцина на слизистой оболочке дыхательных путей значительно интенсивнее, чем незаряженного аэрозоля.

Экспериментальные исследования С. Сибуль показали, что отрицательные аэроионы и электроаэрозоли ускоряют заживление ран и способствуют излечению туберкулеза.

Биологическое действие электроаэрозолей доказывается также их успешным применением в лечебницах. В отделении ото-

риноларингологии Тартуской клинической больницы в 1965-77 гг. подвергались лечению электроаэрозолями как в стационаре, так и амбулаторно 17040 больных. Лечились больные озеной, атрофическим ринитом, аллергической ринопатией и в особенности бронхиальной астмой /20/.

В неврологическом отделении и реанимационном центре нейрохирургического отделения Тартуской клинической больницы (проф. Э. Раудам, зав. центром Э. Кросс и др.) применяют генератор электроаэрозолей ГЭИ-1 и для искусственного дыхания респиратор со специальным генератором электроаэрозолей ГЭИД. В 1954-64 гг. лечили электроаэрозолями 1050 больных энцефалитом и другими неврологическими болезнями, причем смертность при легочных осложнениях понизилась от 50% до 11% умерших вследствие указанных болезней /21/. В 1965-77 гг. лечили электроаэрозолями 2790, а всего 3840 больных. Итого в двух Тартуских клиниках в 1965-77 гг. электроаэрозолями успешно лечили 19830 больных. Все это доказывает, что труды коллектива ПИАЗ по разработке генераторов электроаэрозолей и их внедрению имеют большое значение для здравоохранения СССР, в особенности если учесть их серийное изготовление и внедрение в ингаляторах всего Советского Союза.

## 8. Обзор деятельности секторов ПИАЗ

1. Сектор спектрометрии аэроионов. Основной темой является фундаментальное изучение структуры аэроионов и их физических характеристик в зависимости от примесей в воздухе, а также создание аппаратуры для измерения подвижности аэроионов. Сектор принимает участие в подготовке серийного производства счетчиков аэроионов, предусмотренного в Минске /8, с. 27-35, 48-75; 9, с. 16-23; 10, с. 84-88; II, с. 40-43, 48-51/.

2. Сектор аэрозолей. Основным направлением является исследование процесса электрического заряжения частиц аэрозоля и, исходя из этого, совместно с сектором спектрометрии разработка электрического метода гранулометрии, а также генерирование частиц аэрозоля для калибровки электрогранулометра /8, с. 109-128/. В соответствии с координационным планом ГКНТ СМ СССР подготавливается серийно производство генераторов электроаэрозолей для их применения в ветеринарии /7, с. 129-140; 8, с. 231-236, с. 237-246; 9, с. 104-III; 10, с. 140-146, с. 147-153; II, с. 91-98/.

121

3. Сектор электрометрии. Главной областью деятельности этого сектора является конструирование и усовершенствование электрометрических усилителей с динамическими конденсаторами /18/.

Другая область работы сектора электрометрии относится к измерениям слабых токов. Разработаны калибровочные ионизационные источники тока с номинальной силой тока  $10^{-13} \dots 10^{-9}$  А и резистивные источники тока, снабженные операционными усилителями.

В подавляющем большинстве работы сектора выполнены в виде НИР или ОКР, исходя из потребностей заказчиков, которые внедряли эти работы в практику.

Параллельно с названными работами проводились исследования фотоионизационных и фотоэлектронных спектров некоторых органических молекул. В этих целях применялись изготовленные коллективом сектора ультрафиолетовый монохроматор, спектрометр фотоэлектронов и динамические электрометры /8, с. 330-342; 9, с. 182-188; II, с. 99-138, с. 139-152, с. 153-160/.

4. Сектор газового разряда в своем основном направлении занимается изучением зажигания высокочастотного газового разряда типа острие-плоскость при расстояниях между электродами, равных нескольким сантиметрам.

Целью работы является выяснение механизма формирования одноэлектродного высокочастотного разряда и определения возможности управления разрядом в пространстве в предусмотренном направлении /7, с. 49-61, с. 62-80; 8, с. 287-307, с. 308-316, с. 317-322; 10, с. 3-27, с. 28-58, с. 59-63; II, с. 3-20, с. 21-39; 23; 24/.

5. Сектор геофизических наблюдений занимается выяснением возможностей усовершенствования методов исследования атмосферно-электрических явлений и проведением экспериментальных исследований в полевых условиях с целью изучения атмосферного электричества. В рамках СЭВ выполняются работы по проблеме "Глобальная система мониторинга окружающей среды", в ходе которых ПЛАЭ должна разработать предложения по методам измерения концентраций аэроионов /9, с. 24-29; II, с. 52-56/.

Для исследования загрязненности атмосферы предусмотрены продолжительные измерения атмосферной ионизации на фоновых станциях, на курортах, в промышленных районах и т.д.

Создаются новые эмульгирующие установки и форсунки для

сжигания в специальных печах масел и нефтепродуктов, содержащих в значительном количестве воду, с целью предотвращения загрязнения окружающей среды. Также разрабатываются специальные установки для очистки трюмных вод рыболовных судов от нефти и масел в целях предотвращения загрязнения водоемов.

### Выводы

Учитывая вышеприведенные данные о работе ПЛАЭ, в частности, количество опубликованных научных трудов (538) и изобретений (58), объем выполненных хозяйственных работ (1974-77 гг. 938 тыс. руб.) и достигнутый экономический эффект (за 1973-77 гг. 3 млн. руб.), вполне обосновано можно утверждать, что коллектив ПЛАЭ проделал серьезную работу в интересах нашего народного хозяйства.

По вопросам исследования атмосферной ионизации и созданию аппаратуры для изучения ионизации, атмосферы, а также по прецизионной электрометрии ПЛАЭ является одним из ведущих учреждений в СССР и хорошо известна за рубежом.

### Л и т е р а т у р а

- Ученые записки Тартуского государственного университета. Тарту, 1946-1977.

1. Вып. 22. 1946. 44 с.
2. Вып. 59. 1958. 140 с.
3. Вып. 140. 1963. 140 с.
4. Вып. 195. 1967. 235 с.
5. Вып. 239. 1969. 160. с.
6. Вып. 240. 1970. 325 с.
7. Вып. 283. 1971. 235 с.
8. Вып. 320. 1973. 350 с.
9. Вып. 348. 1975. 192 с.
10. Вып. 409. 1977. 172 с.
11. Вып. 443. 1977. 164 с.
12. Проблемы электроаэрозолей. - Материалы научн.-техн. сообщения. Тарту, 1969, 94 с.
13. Физика атмосферы в Эстонской ССР (1940-1966). Тарту, 1969. 108 с.

14. Куду К.Ф. О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960. 56 с.
15. Прюллер П.К., Раудам Э.И., Рейнет Я.Ю., Сийрде Э.К. Генерирование, физиологическое действие и терапевтическое применение электроаэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1963, вып. 140, с. 16-36.
16. Прюллер П., Рейнет Я. О создании и деятельности Проблемной лаборатории аэрионизации и электроаэрозолей Тартуского государственного университета. - В сб.: Роль Тартуского университета в развитии отечественной науки и в подготовке научно-педагогических кадров. Тарту, 1977, с. 69-75.
17. Прюллер П., Рийв Я. Медицинское значение метеорологических элементов и типов погоды. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1965, вып. 178, с. 27-35.
18. Сакс О.В. О конструкции динамического конденсатора для счетчиков атмосферных ионов. - Тр. Всесоюз. науч. метеорол. совещания. Приборы и методы наблюдений. Л., 1963, т. 9, с. 304-306.
19. Сийрде Э.К. Аэро- и гидроионы в оториноларингологии. Автореф. дис. докт. мед. наук. Л., 1963. 27 с.
20. Сийрде Э.К. О трудах по аэрионизации, аэрозолям и электроаэрозолям, выполненных на медицинском факультете Тартуского государственного университета. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1966, вып. 191, с. 234-251.
21. Раудам Э.И. Острые вирусные нейроинфекции в Эстонской ССР. Доклад, обобщающий опубликованные труды, представленные для защиты степени доктора медицинских наук. Тарту, 1967, с. 55-68.
22. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1967, вып. 195, с. 235.
23. Aints M.H., Haljaste A.J., Korge H. J., Kudu K.F., Laan M.R. Formation of the HF point-discharge. - Proc. 4th Int. Conf. on Gas Discharges. Swansea (Great Britain), 1976, p. 220-224.
24. Aints M., Haljaste A., Kudu K. Sequence of the primary-secondary streamer of the short point-to-plane air gap. - Proc. 5th Int. Conf. on Gas Discharges. Liverpool (Great Britain), 1978, p. 265-268.

25. Tammet H.F. The aspiration method for determination atmospheric-ion spectra. Jerusalem, 1970, 208 p.

RESEARCH LABORATORY FOR AIR IONIZATION AND  
ELECTROAEROSOLS OF TARTU STATE UNIVERSITY,  
ITS FOUNDATION, STRUCTURE AND A SURVEY OF ITS ACTIVITIES

P. Prüller

S u m m a r y

The Research Laboratory for Air Ionization and Electro-aerosols was founded attached to the Chair of General Physics of Tartu State University by a decree of the Council of Ministers of the Estonian SSR issued on 31st March 1964. The initiator of its establishment was Asst. Professor Jaan Reinet, who also headed the Laboratory from 1964 - 74. Research into the subject matter of the Laboratory started already before the creation of the Laboratory by the establishment of a close contact with several Chairs of the Medical Faculty of Tartu State University. The Laboratory comprises five sections (spectrometry of air ions, aerosols, electrometry, gas discharges and geophysical observations). Its staff includes 62 research workers of whom nine are candidates of physical and mathematical sciences. The subject matter of the Laboratory was the object of study for two doctors and two candidates of medical sciences.

In the years 1955 - 77 the research workers of the Laboratory in collaboration with the above-mentioned medical research workers compiled and published altogether 538 scientific papers, of which 64 were published abroad. The above medical people have been authors or co-authors of one-third (189) of the total papers. In the period of 1970 - 1977, 265 papers were published, 49 papers of which were published abroad. Their bibliography has been presented in the list which follows the present report.

The physicists and medical people of Tartu State University presented scientific reports and abstracts on the subject matter of the Laboratory at 113 scientific con-

gresses and conferences, 88 of them in the Soviet Union and 25 at international congresses abroad.

In the years 1957 - 77 members of the staff of the Laboratory were authors of inventions, 57 of which were awarded patents by the Patent Office of the USSR, of them 20 patents were issued on electroaerosol generators.

The major instruments designed and built by the members of the Laboratory staff included electroaerosol generators for individual and group ionization, devices for the vaccination of agricultural animals and domestic birds, a dynamic electrometer for currents of an intensity of  $10^{-18}$  to  $10^{-5}$  A and air-ion counters. Several instruments were passed on for series production. A great number of devices were displayed at 43 exhibitions in 1970 - 77, 8 of them abroad. The total economic effect in 1973 - 77 obtained from the application of the above instruments and devices produced by Laboratory staff amounted approximately to 3 million roubles.

In the years 1964 - 77 the Laboratory had 155 contractual partners. Orders of contracts were received from 92 research institutes, 23 specialized state institutions, 21 plants etc., located all over the Soviet Union.

According to subject matter the contracts fall into the following groups: counters (64), dynamic electrometers (19), equipment for the purification of sewage and for the burning of oil residues (18), etc.

In the years 1965 - 77 in two major clinics of Tartu 19,830 patients were treated with beneficial effects with electroaerosols generated by the generators made at the Laboratory or produced in series. In 1975-77, 6560 electroaerosol generators were produced in series, which are used in hospitals all over the Soviet Union.

To sum up, the Research Laboratory for Air Ionization and Electroaerosols in Tartu is a leading centre in the Soviet Union for the scientific study of atmospheric ionization and electrometry as well as for the design and construction of ionization and electrometric equipment. The Laboratory is known both in the Soviet Union and abroad.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ И ИЗОБРЕТЕНИЙ СОТРУДНИКОВ  
ПРОБЛЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ АЭРОИОНИЗАЦИИ И  
ЭЛЕКТРОАЭРОЗОЛЕЙ ТТУ за 1969-1978 гг.

Нижеследующий библиографический список является продолжением аналогичных списков, опубликованных в Ученых записках Тартуского гос. университета 1970 г. вып. 240 и 1971 г. вып. 283.

А в т о р е ф е р а т ы д и с с е р т а ц и й

Виснапу Л.Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование генерации электроаэрозолей при пневматическом распылении жидкости в электрическом поле. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Тартуский гос. ун-т. Тарту, 1975. 36 с. Библ. 33 назв., изобрет. 14 назв.

Тамм Э.И. Функциональная зарядка аэрозольных частиц. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Тартуский гос. ун-т. Тарту, 1975. 20 с. Библ. 7 назв.

Фишер М.М. О траекторном методе определения размеров и зарядов аэрозольных частиц. Автореф. дис. канд. техн. наук. Гл. геофиз. обсерватория. Л., 1977. 17 с. Библ. 6 назв.

С т а т ь и и т е з и с ы

Айнтс М.А., Веймер В.А., Куду К.Ф. Вольт-вольтовые характеристики униполярного ВЧ разряда на частоте 0,4 МГц при пониженных давлениях в воздухе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 62-80. Библ. 11 назв.

Айнтс М.А. Стабилизированный источник постоянного напряжения 0+40 кВ. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 317-322. Библ. 2 назв.

Айнтс М.А., Куду К.Ф., Хальясте А.Я. Исследование последовательности первичный-вторичный стример в воздухе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та 1977, вып. 443, с. 3-20. Библ. 12 назв.

Айнтс М.А., Бесхлебный С.И., Куду К.Ф. Наблюдения за возникновением и развитием световых и токовых импульсов ВЧ



короны в диапазоне частот 0,15-1,5 МГц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 21-39. Библ. 12 назв.

Айнтс М.Х., Куду К.Ф., Хальясте А.Я. Пространственно-временное развитие одноэлектродного ВЧ. заряда. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 28-58. Библ. 12 назв.

Акопян М.Е., Виллем Я.Я. Ионно-молекулярные реакции при фотомонизации муравьиной кислоты. - II всесоюз. конф. по масс-спектрометрии. Тезисы докл. Л., 1974, с. 136-137.

Акопян М.Е., Виллем Я.Я. Масс-спектроскопическое исследование процессов фотомонизации паров карбоксильных соединений. - IV всесоюз. конф. по спектроскопии вакуумного ультрафиолета и взаимодействию излучения с веществом (ВУФ-75). Тезисы докл. Ужгород, 1975, с. 137-138.

Акопян М.Е., Виллем Я.Я. Ионно-молекулярные реакции при фотомонизации паров муравьиной и уксусной кислот. - Химия высоких энергий, 1976, т. 10, № 1, с. 30-34. Библ. 12 назв.

Ансо М.Х., Виллем Я.Я., Мадисе Т.В., Сакс О.В., Посметухова Г.В. Ионизационные источники тока ИИТ-10 ... 13. - Тезисы докл. науч.-техн. конф. "Электрометрические измерители микротока и напряжения". Минск, 1973, с. 48-49.

Ансо М.Х., Кайтса Э.Е., Сакс О.В. Малогабаритный электрометр УТ-6907 с динамическим конденсатором, имеющий универсальное питание. - Научные приборы СЭВ. Комитет по науч.-техн. сотрудничеству. М., 1973, № 2(16), с. 61-64.

Ансо М.Х., Кайтса Э.Е., Кирс Ю.Э., Курятник Е.И., Мадисе Т.В., Посметухова Г.В., Сакс О.В., Хяммалов Ю.А. Обзор электрометрических устройств, разработанных лабораторией электрометрии ТГУ. - Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., посвящ. Дню Радио. Таллин, 1973, с. 13-15.

Ансо М.Х., Кайтса Э.Е., Кирс Ю.Э., Курятник Е.И., Мадисе Т.В., Посметухова Г.В., Сакс О.В., Хяммалов Ю.А. Обзор электрометрических устройств серии УТ. - Тезисы докл. науч.-техн. конф. "Электрометрические измерители микротока и напряжения". Минск, 1973, с. 6-7.

Ансо М.Х. О расширении полосы пропускания электрометрического усилителя с динамическим конденсатором. - Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию со дня изо-

бретения радио А.С. Поповым. Таллин, 1975, с. 85.

Ансо М.Х. Расширение полосы пропускания усилителя с динамическим конденсатором при помощи параллельного канала. - Измерит. техника, 1976, № 9, с. 55-57. Библ. 4 назв.

Ансо М.Х., Боолайд Х. Й. Усовершенствованный вариант лабораторной работы по изучению распределения термоэлектронов по скоростям. - Актуальные вопросы методики преподавания физики. Тезисы докл. 6-го зонального совещ.-семинара. Рига, 1977, с. 67.

Ансо М.Х., Пярн М.М., Роос М.Э., Сакс О.В. Резистивный источник тока для калибровки бортовой аппаратуры в диапазоне  $10^{-10}$ - $10^{-6}$  А. - Второй междунар. семинар соц. стран "Научное космическое приборостроение". Тезисы докл. Фрунзе. М., 1978, с. 137.

Арольд М.У., Бернотас Т.П. Лазерный нефелометр на базе ФЭН-58. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 83-86. Библ. 3 назв.

Арольд М.У., Матизен Р.Л. Об атмосферном электричестве на планируемой фоновой станции Боровое. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 44-47. Библ. 2 назв.

Арольд М.У., Мирме А.А. Фотоэлектрический тиндаллоскоп. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 132-139. Библ. 1 назв.

Аруксаар Х.К., Матизен Р.Л., Рейнет Я.Ю. Об оценке загрязненности воздуха по спектру аэроионов. - Материалы физ.-хим. промышленной и приборной секции III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, с. 180-181, Библ. 3 назв.

Белов М.Н., Виснапуу Л.Ю., Дворкин А.М. О повышении производительности электробаэрозольного устройства для групповой вакцинации. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 91-98. Библ. 4 назв.

Борзов В.М., Виллем Я.Я., Илюкович А.М., Сакс О.В. Калибровочные источники малых постоянных токов. - Измерит. техника, 1969, № 6, с. 33-37. Библ. 40 назв.

Веймер В.А., Куду К.Ф. Изучение фаз развития униполярного ВЧ разряда в диапазоне 3-20 МГц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 49-61. Библ. 6 назв.

Веймер В.А., Хальясте А.Я. О методике снятия счетных характеристик стримеров положительной короны в промежутке острие-плоскость. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 81-103. Библ. 7 назв.

Виллем Я.Я., Пиквер Р.И., Сакс О.В. Установка для исследования фотоионизации. - III всесоюз. конф. по спектроскопии вакуумного ультрафиолета и взаимодействию излучения с веществом (ВУФ-72). Тезисы докл. Харьков, 1972, с. 65.

Виллем Я.Я., Пиквер Р.И., Сакс О.В. Установка для исследования фотоионизации. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 330-342. Библ. 17 назв.

Виллем Я.Я., Акопян М.Е. Процессы фотоионизации в парах карбоксильных соединений. - II всесоюз. конф. по масс-спектрометрии. Тезисы докл. Л., 1974, с. 137-138.

Виллем Я.Я., Акопян М.Е., Билесов Ф.И. Процессы фотоионизации в парах карбоксильных соединений. Муравьиная кислота и алкилформиаты. - химия высоких энергий, 1975, № 5, с. 407-412. Библ. 24 назв.

Виллем Я.Я., Акопян М.Е. Процессы фотоионизации в парах карбоксильных соединений. Уксусная кислота и алкилацетаты. - Журн. физ. химии, 1976, № 3, с. 674-679. Библ. 11 назв.

Виллем Н.В., Ермолаев С.А., Чиков Ю.В. Фотоселектронные спектры фенилизотиоцианата и его метилпроизводных. - Всесоюз. семинар по физике вакуумного ультрафиолетового излучения и взаимодействию излучения с веществом (ВУФ-78). Материалы семинара. Л., 1978, с. 177.

Виснапуу Л.Ю. К теории индукционной электризации распыляемых жидкостей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 141-156. Библ. 17 назв.

Виснапуу Л.Ю., Ленцнер Х.И., Сийрде Т.З. Пневматический генератор электроаэрозолей для дезинфекции жилых помещений. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 129-140. Библ. 11 назв.

Виснапуу Л.Ю. Электростатическое рассеяние заряженных частиц в турбулентной струе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 157-166. Библ. 12 назв.

Виснапуу Л.Ю. К оптимизации режима работы пневматических генераторов электроаэрозолей. - Материалы II всесоюз. конф.

по применению аэрозолей в народном хозяйстве. Одесса, 1972, с. 55.

Виснапуу Л.Ю., Смирнова Л.А., Тамм Э.И. Новый принцип конструирования медицинских аэрозольных аппаратов. - Материалы мед. секц. и секц. "Аэрозольные баллоны" II всесоюз. конф. по аэрозолям. Одесса, 1972, с. 152.

Виснапуу Л.Ю. К нейтрализации статического электричества летательного аппарата путем удаления заряженных частиц. - Тезисы докл. III всесоюз. науч.-техн. конф. по прикл. аэродинамике. Киев. 1973, с. 43.

Виснапуу Л.Ю., Смирнова Л.А., Савельева В.Ф. О дозировании и эффективности ингаляционного электроаэрозоля у создаваемого генератором типа ГЭИ-1. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 237-246. Библ. 8 назв.

Виснапуу Л.Ю. Пневматический распылитель с индуцирующим электродом. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 209-216. Библ. 10 назв.

Виснапуу Л.Ю. Расчет скорости осаждения заряженных частиц на изолированное тело в переменном электрическом поле. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 217-230. Библ. 12 назв.

Виснапуу Л.Ю. Экспериментальное исследование моделей пневматического распылителя с индуцирующим электродом. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 187-208. Библ. 17 назв.

Виснапуу Л.Ю., Закомырдин А.А., Рейнет Я.Ю. Электризация конденсационного аэрозоля при помощи зарядного устройства с коронирующими электродами. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 247-264. Библ. 16 назв.

Виснапуу Л.Ю., Тамм Э.И., Рейнет Я.Ю., Смирнова Л.А. Электроаэрозольный ингалятор типа ГЭИ-1. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 231-236. Библ. 5 назв.

Виснапуу Л.Ю. К вопросу об удалении заряженных частиц от генератора. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 86-91. Библ. 4 назв.

Виснапуу Л.Ю. Распылитель с соплами Бергсона, снабженный стержневым индуцирующим электродом. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 92-103. Библ. 7 назв.

Виснапуу Л.Ю. Электрическое заряджение частиц аэрозоля с применением коронного разряда. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 56-85. Библ. 62 назв.

Виснапуу Л.Ю., Рейнет Я.Ю., Сула Э.В. Аэрозольное устройство для групповой вакцинации животных и птиц. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 3, с. 29.

Виснапуу Л.Ю. Об исследовании распылителя Бергсона с сепарацией крупных капель и эжекцией добавочного воздуха. - Материалы физ.-хим. промышленной и приборной секции III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, с. 182-183.

Виснапуу Л.Ю., Петерсон К.А., Пярнасте Э.Э. Об исследовании эффективности применения аэрозолей в промышленном птицеводстве. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 3, с. 27-28.

Виснапуу Л.Ю., Гриншпун Л.Е., Норик Б.Ф., Приймаги Л.С., Рейнет Я.Ю., Суби К.Х. Об эффективности электроаэрозольного устройства для групповой вакцинации против гриппа. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т.2, с. 176-177.

Виснапуу Л.Ю. Распылитель с соплами Бергсона и индуцирующим электродом для создания ингаляционных электроаэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 140-146. Библ. 5 назв.

Виснапуу Л.Ю. Распылитель с центральным жидкостным соплом, находящимися под разными потенциалами. - Материалы физ.-хим. промышленной и приборной секции III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, с. 174.

Виснапуу Л.Ю., Гриншпун Л.Е., Норик Б.Ф., Приймаги Л.С., Рейнет Я.Ю., Суби К.Х. Электроаэрозольное устройство для групповой вакцинации против гриппа. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 147-153. Библ. 3 назв.

Виснапуу Л.Ю. Об определении характеристик ионизированного воздуха. - Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф. "Пути сохранения сельскохозяйственной продукции". Одесса, 1978, с. 28.

Гущин А.Е., Виснапуу Л.Ю. Изучение электризации волокон при формировании длинноволокнистой бумаги. - Уч. зап. Тарту-

ского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 169-178. Библ. 6 назв.

Луков А.А., Бесхлебный А.И., Бесхлебный С.И. Стабилизация больших ВЧ напряжений. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 64-73. Библ. 6 назв.

Закомырдин А.А., Виснапуу Л.Ю. Дезинфекция животноводческих помещений электроаэрозолями химических средств. - Тр. ВНИИ вет. санитарии, 1970, т. 36, с. 227-238.

Закомырдин А.А., Симецкий М.А., Виснапуу Л.Ю. К вопросу получения электроаэрозолей из инсекто-акарицидных препаратов. - Материалы II всесоюз. конф. по применению аэрозолей в народном хозяйстве. Одесса, 1972, с. 72-73.

Закомырдин А.А., Виснапуу Л.Ю. Обеззараживание животноводческих помещений электроаэрозолями дезсредств. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 3, с. 41-42.

Зверев В.В., Виллем Я.Я. Применение фотоэлектронной спектроскопии для исследования межмолекулярных взаимодействий и конформаций молекул. - Тезисы конф. по межмолекулярному взаимодействию и конформациям молекул. Баку, 1978, с. 84.

Йентс А.К. О динамике микрофлоры носоглотки и ее чувствительности к антибиотикам в связи с лечением отрицательными электроаэрозолями. - Материалы мед. секции и секции "Аэрозольные баллоны" II всесоюз. конф. по аэрозолям. Одесса, М., 1972, с. 72-73.

Йентс А.К. Влияние отрицательных электроаэрозолей на температуру слизистой оболочки и кожи при неспецифических воспалениях верхних дыхательных путей. - Тр. У науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания оториноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. 148-149.

Йентс А.К. Воздействие аэрозоль- и электроаэрозольтерапии на микрофлору носоглотки у больных хроническими неспецифическими воспалениями верхних дыхательных путей. - Тр. У науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания оториноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. 86-88.

Йентс А.К. О действии отрицательных электроаэрозолей на чувствительность слизистой оболочки глотки у больных хроническими неспецифическими заболеваниями верхних дыхательных

путей. - Тр. У науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания оториноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. II3-II4.

Йентс А.К., Сяргавя В.А. Применение кислородных электроаэрозолей при лечении расстройств слуха. - Тр. У науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания оториноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. 58-60.

Йентс А.К., Сяргавя В.А. Использование кислородных электроаэрозолей при лечении нейросенсорной тугоухости. - Тезисы докл. VIII съезда оториноларингологов СССР. Тбилиси. М., 1975, с. 4I3-4I4.

Йентс А.К., Сяргавя В.А. Роль кислородных электроаэрозолей с отрицательными зарядами при лечении тугоухости. - Тезисы докл. науч. конф. по куртологии и физиотерапии, посвящ. 150-летию курорта Хаапсалу. Хаапсалу. Таллин, 1975, с. 24-25.

Йентс А.К., Ленцнер А.П. Изменения количества микробов слизистой оболочки носоглотки под влиянием отрицательной электроаэрозольтерапии. - Тезисы всесоюз. конф. "Применение ингаляционной терапии в комплексе санаторно-курортного лечения". Пятигорск, 1976, с. 19-20.

Йентс А.К., Арак Э.Х. Электроаэрозольтерапия с эфирным маслом ромашки. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 2, с. 27-28.

Йентс А.К., Арак Э.А. Использование ромашки при ингаляционной терапии. - Современные аспекты оториноларингологии. Тезисы докл. IV респ. науч. конф. оториноларингологов Латв. ССР. Рига, 1978, с. 166-167.

Кайтса Э.Е., Кирс Ю.Э., Мадисе Т.В., Резбен В.А., Сакс О.В. Высокочувствительный электрометр типа УТ-680I с динамическим конденсатором. - Тр. ЭИИЭТРИ. Серия "Электрометрия", 1973, т. 10 (40), с. 18-26. Библ. 6 назв.

Кейс Х., Айнтс М., Пуллеритс Р. Прибор для автоматического определения концентрации кислорода в газовых смесях. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1976, вып. 378, с. 97-101. Библ. 3 назв.

Корге Х.Й., Куду К.Ф. Напряжение возникновения ВЧ короны на частотах от 25 кГц до 1,4 МГц в промежутке острие-плос-

кость. - Уч. зап. **Тартуского гос. ун-та**, 1973, вып. 320, с. 308-316. Библ. II назв.

Корге Х.И., Лаан М.Р. Изучение формирования высокочастотного разряда на факельной частоте. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 3-27. Библ. 30 назв.

Куду К.Ф. Высокочастотный демонстрационный индикатор излучений. - Материалы II науч.-метод. семинара преподавателей физики вузов Прибалт. респ. и Белорус. ССР. Тарту, 1970, с. 275-278. Библ. 10 назв.

Куду К.Ф. О начальных стадиях одноэлектродного ВЧ разряда в атмосферном воздухе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 287-307. Библ. 69 назв.

Лаан М.Р. Высокочастотный генератор прямоугольных радиоимпульсов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 59-63. Библ. 4 назв.

Лоолайд В.Э. О применении электроаэрозолей в системе комплексного лечения новорожденных, родившихся в асфиксии. - Материалы VIII респ. науч.-практ. конф. по актуальным вопр. акушерства и гинекологии. Таллин, 1970, с. 25-26.

Лоолайд В.Э., Микельсаар Р.Н. О влиянии электроаэрозолей на состояние гемоглобина, эритроцитов, гематокрита и электролитов крови у новорожденных детей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 274, с. 99-104.

Лоолайд В.Э., Мейпалу В.Э. О применении электроаэрозолей в комплексе лечения нарушений дыхательных функций новорожденных. - Исследования по пульмонологии. Материалы II объедин. науч. конф. мед. фак. ТТУ, Ин-та эксперим. и клинич. медицины и Таллин. научн.-исслед. ин-та эпидемиологии, микробиологии и гигиены. Таллин, 1971, с. 108-112. Библ. 10 назв.

Лоолайд В.Э., Мейпалу В.Э. О применении электроаэрозолей в комплексе лечения дыхательных расстройств новорожденных. - Материалы I науч. конф. акушеров-гинекологов Лит., Латв. и Эст. ССР. Каунас, 1972, с. 57-58.

Матизен Р.Л., Ютс Э.Ю. Счетчики аэромонов UT-6914 и UT-7406. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 24-29. Библ. 2 назв.



**Матизен Р.Л., Рейнет Я.Ю.** Ионизация атмосферного воздуха и ее гигиеническое и курортное значение. - Тезисы всесоюз. конф. "Применение ингаляционной терапии в комплексе санаторно-курортного лечения". Пятигорск, 1976, с. 22-23.

**Матизен Р.Л., Эзель Я.Р., Ютс Э.Ю., Якобсон А.Ф.** Счетчик аэроионов с цифровой индикацией УТ-7714. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 52-56.

**Мирме А.А., Бернотас Т.П.** Автоматический регулятор температуры аэрозоля. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 87-90. Библ. 1 назв.

**Петерсон К.А., Биснапуу Л.Ю., Пярнасте Э.Э., Рейнварт О.А., Нурме М.Э.** О применении аэрозолей для дезинфекции инкубационных яиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. II2-II9. Библ. 10 назв.

**Петерсон К.А., Пийрсалу М.Х., Ребане К.Х., Биснапуу Л.Ю.** Обработка инкубационных яиц электроаэрозолями тироксина. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 3, с. 76.

**Пиквер Р.И., Мёльдер У.Н.** Фотоэлектронные спектры ряда виниловых сульфидов. Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 182-188. Библ. 4 назв.

**Приймаги Л.С., Гриншпун А.Е., Рейнет Я.Ю., Глазунов В.А., Суои К.Х., Вахер Ю.И.** Использование аэрозольного метода для вакцинации против гриппа. - Сб. тезисов докл. VIII респ. науч. конф. "Кишечные и респираторные инфекции, физическое развитие и состояние здоровья молодежи ЭССР", Таллин, 1974, с. II7-120.

**Пндер Х.А., Рейнет Я.Ю.** Применение отрицательно заряженных аэрозолей в комплексе курортотерапии при лечении больных ревматическим пороком сердца. - Материалы мед. секции и секции "Аэрозольные баллоны" II всесоюз. конф. по аэрозолям. Одесса. М., 1972, с. 81-82.

**Прюллер П.К., Рейнет Я.Ю.** Исследование в области атмосферной ионизации в г. Тарту. - Тезисы докл. и сообщ. на заседании всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. Л., 1973, с. 58-59.

**Прюллер П.К., Рейнет Я.Ю.** Исследование спектра атмосферных ионов, гигиеническое и биометеорологическое значение

ионизации воздуха. - Всесоюз. науч.-техн. симпози. "Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха". Материалы докл., Ялта, 1975, с. 2-7. Библ. 10 назв.

Прюллер П.К., Рейнет Я.Ю. Исследования в области атмосферной ионизации в Тарту. - Атмосферное электричество. Тр. I всесоюз. симпози. по атмосферному электричеству. Ленинград, 1973. Л., 1976, с. 313-316. Библ. 5 назв.

Прюллер П.К., Рейнет Я.Ю. О создании и деятельности Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей Тартуского государственного университета. - В сб.: Роль Тартуского университета в развитии отечественной науки и в подготовке научно-педагогических кадров. Тезисы докл. XI Прибалт. конф. по истории науки и техники. Тарту, 1977, с. 69-75. Библ. 16 назв.

Посметухова Г.В., Сакс О.В. Ионизационный источник тока ИИТ-10 - ИИТ-13. - Измерит. техника, 1976, № 9, с. 68-70. Библ. 6 назв.

Рейнет Я.Ю. О счетчиках атмосферных ионов и электроаэрозолей. - Проблемы электроаэрозолей. Тарту, 1969, с. 75-76.

Рейнет Я.Ю., Пидер Х.А., Ундла И.Ю., Ютс Э.Ю., Сула Э.В. Камерный метод комплексного применения электроаэрозолей в курортологии. - Материалы VIII Эст. респ. науч. конф. по курортологии и физиотерапии. Таллин, 1971, с. 156-159. Библ. 1 назв.

Рейнет Я.Ю. Краткий обзор научно-исследовательских работ по аэроионизации и электроаэрозолям. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 3-15. Библ. 79 назв.

Рейнет Я.Ю., Виснапуу Л.Ю., Сула Э.В. Аэрозольное устройство для групповой вакцинации. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 104-111. Библ. 5 назв.

Рейнет Я.Ю., Матизен Р.Л. О некоторых измерениях концентрации аэроионов, проведенных на промышленных предприятиях и на курортах. - Тезисы докл. науч. конф. по курортологии и физиотерапии, посвящ. 150-летию курорта Хаапсалу. Хаапсалу. Таллин, 1975, с. 64-65.

Рейнет Я.Ю., Сула Э.В. Коэффициент полезного действия (к.п.д.) групповой аэрозольной вакцинации. - Тезисы III все-

союз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 3, с. 83.

Роос М.Э., Сакс О.В. Применение параллельных синхронных детекторов для расширения полосы пропускания МДМ-усилителя. - Измерительные усилители, функциональные преобразователи и преобразователи мощности. Секц. 3. Тезисы докл. всесоюз. науч.-техн. семинара "Вопросы теории и проектирования аналоговых измерительных преобразователей, параметров электрических сигналов и цепей". Ульяновск, 1978, с. 12-13. Библ. 2 назв.

Рулли А., Сээдер Я., Сакс О. Исследования периферического кровообращения термическим методом. - Исследования по кровообращению. Материалы IV респ. науч. конф. Тарту, 1973, с. 132-140.

Сакс О.В. Об инженерном методе расчета динамического конденсатора. - Тезисы докл. науч.-техн. конф. "Электрические измерители микротока и напряжения". Минск, 1973, с. 10-11.

Сакс О.В. Сравнительный анализ блок-схем высокочувствительных устройств с динамическим конденсатором. - Тезисы докл. науч.-техн. конф. "Электрометрические измерители микротока и напряжения". Минск, 1973, с. 8.

Сакс О.В. Собственные помехи преобразователя с динамическим конденсатором. - Тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию со дня изобретения радио А.С. Поповым. Таллин, 1975, с. 83-84.

Сакс О.В., Посметухова Г.В., Пярн М.М. Резистивный источник тока  $10^{-8} - 10^{-14}$  А с электрометрическим усилителем. - Первый междунар. семинар соц. стран. "Научное космическое приборостроение" (СССР, г. Фрунзе). Тезисы докл. М., 1976, с. 130-132. Библ. 2 назв.

Сакс О.В., Хяммалов Ю.А. Исследование возможности использования пьезокерамической системы возбуждения в динамическом конденсаторе. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 139-152. Библ. 11 назв.

Сакс О.В. Собственные помехи преобразователя с динамическим конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 99-138. Библ. 23 назв.

Салым Я.И. Об уменьшении времени реакции счетчика аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320,

с. 101-108. Библ. 1 назв.

Салым Я.И. Измерение проводимости воздуха в общем физическом практикуме. - Актуальные вопросы преподавания физики. Тезисы докл. 6-го зонального совещ.-семинара. Рига, 1977, с. 83.

Салым Я.И. Об униполярной зарядке первоначально заряженного аэрозоля. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 57-61. Библ. 2 назв.

Салым Я.И., Матизен Р.Л. Некоторые результаты исследования влияний примесей воздуха на спектр подвижности легких отрицательных аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 40-43. Библ. 4 назв.

Салым Я.И. Распределение зарядов при униполярной зарядке первоначально заряженного аэрозоля. - Материалы физ.-хим. промышленной и приборной секции III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977. т. 3, с. 50-51. Библ. 3 назв.

Сибуль С.Ф. Использование терапии отрицательными кислородными электроаэрозолями в отделении уха-горла-носа Тартуской республиканской клинической больницы с 1962 по 1969 гг. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 118-123, ил. Библ. 3 назв.

Сибуль С.Ф. О влиянии затруднения носового дыхания на внешнее дыхание и воздействие на него электроаэрозолями. - Исследования по пульмонологии. Материалы объедин. научн. конф. мед. фак. ТГУ, Ин-та эксперим. и клинич. мед. и Таллин. науч.-исслед. ин-та эпидемиологии, микробиологии и гигиены. Таллин, 1971, с. 189-192. Библ. 4 назв.

Сибуль С.Ф. О влиянии ингаляции электроаэрозолей на диурез и концентрацию электролитов в моче собак с удаленным мочевым пузырем. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 285, с. 220-225. Библ. 4 назв.

Сибуль С.Ф. О некоторых функциональных изменениях слизистой оболочки носа у больных с аллергической ринопатией при лечении электроаэрозолями. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 285, с. 363-367. Библ. 6 назв.

Сибуль С.Ф. О влиянии аэроионов и электроаэрозолей на кислотно-щелочное равновесие крови. - Материалы мед. секц. и секц. "Аэрозольные баллоны" II всесоюз. конф. по аэрозолям. Одесса. М., 1972, с. 84-85.

Сибуль С.Ф. О влиянии электроаэрозолей на кислотно-щелочное равновесие крови у больных аллергической ринопатией. - Журн. ушных, носовых, горловых болезней, 1972, № 3, с. 71-74. Библ. 12 назв.

Сибуль С.Ф. Об изменениях показателей внешнего дыхания у больных аллергической ринопатией во время ингаляции кислородных электроаэрозолей. - Тр. У науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания оториноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. 69-70.

Сибуль С.Ф. О факторах, влияющих на эффективность лечения электроаэрозолями больных аллергической ринопатией. - Тр. У науч.-практ. конф. оториноларингологов ЭССР, посвящ. 80-летию основания оториноларингологии в ЭССР. Тарту, 1973, с. 97-98.

Сибуль С.Ф. О влиянии подогретых и прохладных электроаэрозолей на реакцию кровеносных сосудов слизистой оболочки носа у больных аллергической ринопатией. - Тезисы докл. науч. конф. по курортологии и физиотерапии, посвящ. 150-летию курорта Хаапсалу. Хаапсалу. Таллин, 1975, с. 71-72.

Сибуль С.Ф. О влиянии электроаэрозолей на функцию защитной системы слизистой оболочки носа и ее рефлекторные связи. - Тезисы докл. науч. конф. по курортологии и физиотерапии, посвящ. 150-летию курорта Хаапсалу. Хаапсалу. Таллин, 1975, с. 72-74.

Сибуль С.Ф. Некоторые наблюдения в связи с применением термоэлектроаэрозолей при заболеваниях дыхательных путей. - Тезисы всесоюз. конф. "Применение ингаляционной терапии в комплексе санаторно-курортного лечения". Пятигорск, 1976, с. 56-57.

Сибуль С.Ф. Некоторые наблюдения о местном и общем действии электроаэрозолей. - Тезисы III всесоюз. конф. по аэрозолям. Ереван. М., 1977, т. 2, с. 33-35.

Сибуль С.Ф., Сийрде Э.К. О лечении больных бронхиальной астмой в ринологическом аспекте. - Материалы симпозиума "Вопросы лечения больных бронхиальной астмой". Таллин, 1977, с. 69-72.

Сибуль С.Ф., Вендер А.А. Электрометрические измерения в связи с аэроионотерапией заболевания уха. - Современные ас-

пекты оториноларингологии. Тезисы докл. IV респ. науч. конф. оториноларингологов Латв. ССР. Рига, 1978, с. 197-198.

Сийрде Э.К. Об изменении температуры небных миндалин и кожи под действием электроаэрозолей при хроническом тонзиллите. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 285, с. 368-372. Библ. 8 назв.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Сийрде Т.Э., Палм Д.Т. О действии электроаэрозолей на чувствительности рецепторов слизистой оболочки верхних дыхательных путей. - Материалы VIII эст. респ. науч. конф. по курортологии и физиотерапии. Таллин, 1971, с. 178-180.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Сийрде Т.Э., Палм Д.Т. О дифференциальной диагностике хронического тонзиллита, основанной на регистрации изменений температуры и чувствительности рецепторов слизистой оболочки небных миндалин. - Тезисы докл. IV съезда оториноларингологов УССР. Киев, 1971, с. 40-41.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Йентс А.К. О применении в оториноларингологии аэроионизаторов, аэрозольных и электроаэрозольных аппаратов, сконструированных тартускими физиками. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 110-117.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф., Сийрде Т.Э., Палм Д.Т. Действие электроаэрозолей на чувствительность и температуру слизистых оболочек верхних дыхательных путей. - Материалы мед. и секц. "Аэрозольные баллоны" II всесоюз. конф. по аэрозолям. Одесса. М., 1972, с. 83-84.

Сийрде Э.К., Сибуль С.Ф. Об изменениях температуры слизистой оболочки носа и поверхности тела у больных аллергической ринопатией. - Новые методы диагностики и лечения заболеваний уха, горла и носа. Рига, 1972, с. 46-49.

Сийрде Э.К., Йентс А.К., Рейнет Я.Ю. Изменения некоторых показателей роста растений под влиянием чрезмерной ионизации. - Материалы всесоюз. науч.-техн. симпоз. "Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха". Ялта. М., 1975, т. 2, с. 203-204. Библ. 1 назв.

Смирнова Л.А., Виснапуу Л.Ю., Горяйнова А.А., Максимова О.Н., Тамм С.И., Прошин В.А. Генератор электроаэрозолей индивидуальный ГЭИ-1. - Материалы мед. секц. и секц. "Аэро-

зольные баллоны" II всесоюз. конф. по аэрозолям. Одесса. М., 1972, с. 163.

Сула Э.В., Рейнет Я.Ю. Некоторые проблемы конструирования электроаэрозольных генераторов. - Тезисы докл. всесоюз. конф. по проблемам электроаэрозолей. Тарту, 1969, с. 55.

Сула Э.В., Рейнет Я.Ю. Дозирование при аэрозольном методе вакцинации. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 124-128. Библ. 1 назв.

Сула Э.В. Об определении концентрации аэрозоля, пополняемого частицами. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 120-124. Библ. 12 назв.

Сула Э.В., Тамме В.Б. Об определении массовой концентрации аэрозоля измерением перепада давления на фильтре. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 125-131. Библ. 4 назв.

Сула Э.В. Кинетика коагуляции в аэрозольной системе при постоянном притоке и стоке частиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 125-131. Библ. 8 назв.

Сулбис Л.А. О физических основах оценки химического влияния ультразвука. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1970, вып. 240, с. 311-322, Библ. 48 назв.

Сэедер Я., Рулли А., Сакс О. Изменения кровообращения кожи стопы в связи с травмой голени. - Исследования по кровообращению. Материалы IV респ. науч. конф. Тарту, 1973, с. 144-146.

Сяргава В.А., Йентс А.К. Применение кислородных аэро- и электроаэрозолей при лечении тугоухости. - Тезисы всесоюз. конф. "Применение ингаляционной терапии в комплексе санаторно-курортного лечения". Пятигорск, 1976, с. 90-91.

Сяргава В.А., Йентс А.К. Кислородные электроаэрозоли и аэрозоли в лечении тугоухости. - Современные аспекты оториноларингологии. Тезисы докл. IV респ. науч. конф. оториноларингологов Латв. ССР, Рига, 1978, с. 91.

Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. О методах получения мономолекулярных аэрозолей. - Материалы II всесоюз. конф. по применению аэрозолей в народном хозяйстве. Одесса, 1972, с. 55.

Тамм Э.И., Фишер М.М. Определение размеров и зарядов

аэрозольных частиц в пределах радиусов от 0,35 до 1,2 мкм ультрамикроскопическим (траекторным) методом. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 109-128. Библ. 15 назв.

Тамм Э.И. Экспериментальная система для генерирования и определения параметров мономобильного аэрозоля. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 130-162, Библ. 33 назв.

Тамм Э.И. Экспериментальное исследование генератора мономобильного аэрозоля. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 163-176. Библ. 7 назв.

Тамм Э.И. О функциональной зарядке аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 35-55, Библ. 23 назв.

Таммет Х.Ф. Больтамперная характеристика обратной квази-короны между цилиндрическими электродами. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 30-36. Библ. 1 назв.

Таммет Х.Ф. Расчет аспирационного конденсатора на максимум удельной интенсивности осаждения аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 16-29. Библ. 4 назв.

Таммет Х.Ф. Таблица специальной функции цилиндрического коронного разряда. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 37-48.

Таммет Х.Ф., Якобсон А.Ф. Автоматическое управление одноканальным спектрометром аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 27-35. Библ. 1 назв.

Таммет Х.Ф. Индукционный эффект в модулирующем измерительном конденсаторе счетчика аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 13-19. Библ. 3 назв.

Таммет Х.Ф. К общим проблемам спектрометрии аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 5-12. Библ. 5 назв.

Таммет Х.Ф. К проблеме разрешающей силы в спектрометрии. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 76-100. Библ. 11 назв.

Таммет Х.Ф., Якобсон А.Ф., Салым Я.И. Многоканальный ав-



томатический спектрометр аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 48-75, ил. Библ. 3 назв.

Таммет Х.Ф., Леппик К.П. Опытный счетчик аэроионов с модулирующим измерительным конденсатором. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 20-26. Библ. 3 назв.

Таммет Х.Ф. Система обработки наблюдений для одноканального спектрометра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 36-47. Библ. 4 назв.

Таммет Х.Ф. Справочные материалы для пользования системой программирования МАЛГОЛ-73. (Таллинский политехн. ин-т и Таллин. пед. ин-т). Таллин, 1973, 88 с.

Таммет Х.Ф., Салым Я.И., Якобсон А.Ф. Автоматический многоканальный спектрометр аэроионов. - Физические аспекты загрязнения атмосферы. Тезисы докл. междуна. конф. Вильнюс, 1974, с. 145-146.

Таммет Э., Таммет Х. Вычисление коэффициентов сложения угловых моментов. - Изв. АН ЭССР. Физика. Математика. 1974, т. 23, № 1, с. 81-85.

Таммет Х.Ф. Спектрометрия подвижностей аэроионов и измерение загрязнений воздуха. - Физические аспекты загрязнения атмосферы. Тезисы докл. междуна. конф. Вильнюс, 1974, с. 146-147.

Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии. Таллин, 1975, 100 с.

Таммет Х.Ф. Зависимость спектра подвижностей легких аэроионов от микропримесей воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 3-15. Библ. 7 назв.

Таммет Х.Ф. Об электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 30-34.

Таммет Х.Ф. Спектрометрия подвижностей аэроионов как метод электроанализа воздуха. - Материалы всесоюз. науч.-техн. симпози. "Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха". Ялта. М., 1975, т. 1, с. 269-276. Библ. 12 назв.

Таммет Х.Ф. Элементарная теория многоканального динамического электрометра. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 155-181. Библ. 3 назв.

Таммет Х.Ф., Хилпус А.О., Салым Я.И., Ютс Э.Ю. Спектрометр аэроионов для обнаружения некоторых примесей воздуха. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 84-88. Библ. 4 назв.

Трофимов Б.А., Мёльдер У.Х., Пиквер Р.И., Вялых Е.П., Недоля Н.А. Влияние соседних кратных связей и гетероатомов на ионизационные потенциалы спиртов и эфиров. - Изв. АН СССР. Сер. хим., 1974, № 12, с. 2731-2740. Библ. 13 назв.

Трофимов Б.А., Мёльдер У.Х., Пиквер Р.И., Вялых Е.П. Ионизационные потенциалы ненасыщенных сульфидов и участие соседних кратных связей и гетероатомов в стабилизации катион-радикала. - Теорет. и эксперим. химия, 1975, т.2, с. 165-173. Библ. 17 назв.

Фишер М.М. Об определении размеров и заряда отдельных частиц аэрозолей. - Материалы XXIV науч. студ. конф. Тарту, 1969, часть I, с. 3-4.

Фишер М.М., Якобсон А.Ф. Коммутатор для синхронизации прерывистого освещения с напряженностью электрического поля в ультрамикроскопическом измерителе размеров и зарядов аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 220-229. Библ. 6 назв.

Фишер М.М., Мирме А.А. О выборе оптимальных параметров электрического поля, используемого в осцилляционном измерителе размеров и зарядов аэрозольных частиц. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 206-219. Библ. 3 назв.

Фишер М.М., Таммет Х.Ф., Тамм Э.И. Полуавтоматическая проекционно-измерительная установка. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1973, вып. 320, с. 129-138. Библ. 2 назв.

Фишер М.М., Тамм Э.И. Траекторный и аспирационный метод измерения функции распределения аэрозолей. - "Физические аспекты загрязнения атмосферы". Тезисы докл. междунар. конф. Бильнюс, 1974, с. 144-145.

Фишер М.М. Исследование спектра аэрозольных частиц траекторным методом. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 74-82. Библ. 12 назв.

Фишер М.М., Вайн А.А., Зинковский А.В. Исследование точности киноциклографического метода. - Уч. зап. Тартуского

гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 58-59. Библ. 1 назв.

Фишер М.М. Теоретические основы траекторных спектрометров. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 409, с. 97-124. Библ. 9 назв.

Халлер К.Э., Салым Я.И. Ионизатор газа с однородной ионизационной зоной. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1971, вып. 283, с. 104-109. Библ. 1 назв.

Хяммалов Ю.А. Функциональный генератор УТ-7520 на базе интегрирующего усилителя и анализ его погрешностей нелинейности. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1977, вып. 443, с. 153-160. Библ. 8 назв.

Опрус Я.В., Рейнет Я.Ю. Некоторые проблемы в теории фототрафического осцилляционного метода, связанные с напряжением, подаваемым на электроды кюветы. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1970, вып. 240, с. 279-289. Библ. 7 назв.

Якобсон А.Ф., Тамм Э.И., Рейнет Я.Ю. Генератор электроаэрозолей к приборам искусственного дыхания. - Проблемы электроаэрозолей. Тарту, 1969, с. 65-66.

Якобсон А.Ф., Салым Я.И., Таммет А.Ф. Некоторые результаты испытания многоканального автоматического спектрометра аэроионов. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1975, вып. 348, с. 16-23. Библ. 3 назв.

Aints M., Veimer V., Kudu K. Onset potentials of HF point discharge phenomena at lower pressures. - Proc. 10th Intern. Conf. Ionized Gases, Contr. Papers. Oxford, 1971, p. 144. Bibl. 4 ref.

Aints M.H., Haljaste A. J., Korge H. J., Kudu K.F., Laan M.R. Formation of the HF point-discharge. - Proc. 4th Intern. Conf. Gas Discharges. Swansea (Great Britain), 1976, p. 220-221.

Ainst M., Haljaste A., Kudu K. Investigation of HF point discharge formation by electron-optical technique. - Proc. 13th Intern. Conf. Ionized Gases. Contr. Papers, P. 1. Berlin, 1977, p. 437-438. Bibl. 2 ref.

Aints M.H., Haljaste A.J., Kudu K.F. Sequence of the primary-secondary streamer in short point-to-plane air gaps. - Proc. 5th Intern. Conf. Gas Discharges. Liverpool (Great Britain), 1978, p. 265-268. Bibl. 12 ref.

Aruksaar H., Matisen R., Reinet J. Estimation of air pollution from the air ion spectrum. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAeM). Abstr. Warszawa, 1977, abstr. 91.

Chernobylski I.I., Pavlishchev M.I., Polyvanyi A.N., Salm J.J. Spray conditioner for medical pressure chambers. - 13th Intern. Congr. of Refrigeration. Summaries of Papers. Washington, 1971, 814-816. (Bull. of the Intern. Inst. of Refrigeration 51, 3 Special issue).

Fischer M., Jakobson A., Kikas U., Miller F., Mirme A., Salm J., Tamm E., Tammet H. Electric granulometry of sub-microscopic aerosols. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAeM). Warszawa, 1977, abstr. 62.

Grinshpun L., Priimägi L., Subi K., Reinet J., Visnapuu L. An electroaerosol device for group vaccination against influenza. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAeM). Abstr. Warszawa, 1977, abstr. 30.

Grinshpun L., Priimägi L., Subi K., Reinet J., Visnapuu L. An electroaerosol device for group vaccination against influenza. - Z. Erkrankungen der Atmungsorgane, 1978, Bd. 150, S. 237-238.

Jents A., Lenzner H., Siirde E. Effect of negative electro-aerosols on the microbiological count on the nasopharyngeal mucosa. - Biometeorology, 1975, vol. 6, P. 1. Proc. of the 7th Biometeorological Congr., p. 132, Suppl. to vol. 19, 1975 of the Intern. J. of Biometeorology.

Jents A., Arak E. Inhalation therapy with etherial oil of chamomile. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAeM). Abstr. Warszawa, 1977, abstr. 15.

Koppel I., Pikver R., Mölder U. The dependence of ionization potentials on structure. Correlation with substituent constants and proton affinities. - 26th IUPAC Congr. Abstr. Papers. Tokyo, 1977, vol. 3, p. 909.

Korge H., Kudu K. The onset potential of HF corona in the frequency range from 25 kHz to 1.4 MHz in the point-to-plane discharge gap. - 11th Intern. Conf. Phen. Ionized Gases, Contr. Papers. Prague, 1973, p. 200. Bibl. 4 ref.

Korge H., Kudu K., Laan M. Development of dc corona pulses at atmospheric pressure. - Proc. 13th Intern. Conf. Phen. Ionized Gases, Contr. Papers, P. 2. Berlin, 1977, p. 451-452. Bibl. 4 ref.

Kudu K. Gaaslahenduse vormidest ebaühtlase väljajaotusega lahendusvahemikes. - Täppisteaduste Sekts. Toimet. (ENSV TA LUS) 1971, kd. 6, lk. 41-47. Bibl. 7 nim.

Куду К. О формах газового разряда в разрядных промежутках с неравномерным распределением поля.

Kudu K. Kõrgsageduslahenduse kujunemisest mittehomoogeens elektriväljas. - Täppisteaduste Sekts. Toimet. (ENSV TA LUS), 1975, kd. 8, lk. 97-105. Bibl. 32 nim.

Куду К. О формировании высокочастотного разряда в неоднородном электрическом поле.

Kukk P. Aerosooli automaatne termostabilisaator. - Füüsikaosak. Üliõpilaste tead. töid. Trt., 1978, lk. 24 - 28. Bibl. 4 nim.

Кукк П. Автоматический термостабилизатор аэрозоля.

Laan M., Kudu K. Distribution of luminosity at the onset of a HF corona. - Proc. 12th Intern. Conf. Phen. Ionized Gases, Contr. Papers, P. 1. Eindhoven, 1975, p. 172. Bibl. 3 ref.

Langus L. Balti mere veebasseini kaitsel.- Edasi, 1978, 7. märts.

Лангус Л. На защите водного бассейна Балтийского моря.

Langus L. Naftasaadusi sisaldavate vete puhastamisest.- Tehnika ja Tootmine, 1978, nr. 6, lk. 305-306. Bibl. 5 nim.

Лангус Л. Об очистке вод, содержащих нефтепродукты.

Loolaid V., Mikelsaar R., Reinet J. Effect of negative electroaerosols on the blood acid-base balance in neonates. Biometeorology, 1972, vol. 5, P. 1. Proc. of 6th Intern. Biometeorological Congr. Nordwijk (Netherlands), p. 74, Supp. to vol.16, 1972 of the Intern. J. of Biometeorology.

Loolaid V., Meipalu V., Reinet J. Effect of negative electroaerosols on blood acid-base balance and serum

electrolyte content of newborns with asphyxia. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 216.

Loolaid V., Meipalu V., Reinet J. Effect of negative electroaerosols on blood acid-base balance and serum electrolyte content of newborn with asphyxia. (Die Wirkung von negativ geladenen Elektroaerosolen auf das Säure-Basen-Gleichgewicht des Blutes und den Serumelektrolytgehalt, bei asphyktischen Säuglingen.) - Aerosole. Inhalation Hausmitteilung der Firma C. Heyer GmbH 5427. Bad Ems, 1975, N 12, S. 15.

Miller F. Paljukanaliline elektromeeter. - Füüsikaosak. Üliõpilaste tead. töid. Trt., 1978, lk. 3-10, Bibl. 3 nim.

Миллер Ф. Многоканальный электрометр.

Noppel M. Maatrikselementide vigade arvestamisest staatilise reguleerimise meetodite rakendamisel. - Füüsikaosak. Üliõpilaste tead. töid. Trt., 1978, lk. 30-43. Bibl. 3 nim.

Ноппель М. Об учете ошибок матричных элементов при использовании методов статической регуляризации.

Peterson K., Visnapuu L., Pärnaste, E., Reinart O., Nurme M. Haudemunade nakkusvabaks muutmise neo- ja monomütsiini aerosoolidega. - Sots. Põllumajandus, 1975, nr. 7, lk. 312-314. Bibl. 6 nim.

Петерсон К., Виснапуу Л., Пярнасте Э., Рейнварт О., Нурме М. Обеззараживание инкубационных яиц аэрозолями нео- и мономицина.

Priimägi, L., Grinshpun L., Danilov A., Reinet J. Electroaerosol method for the administration of vaccine interferonogen. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 213.

Priimägi L., Reinet J. Vaccination by the aerosol method. - Z. Erkrankungen der Atmungsorgane, 1978, Bd. 150, S. 239-242.

Prüller P., Reinet J. Biometeorological significance of the study of atmospheric ionization. - Biometeorology, 1969, vol. 4, p. 2. Proc. of the 5th Intern. Biometeorological Congr. held at Montreux, Switzerland, p. 138-139. Suppl. to the vol. 13, 1969 of the Intern. J. of Biometeorology.

Prüller P., Reinet J. Investigation of atmospheric ion spectra, hygienical and biometeorological significance of ionization. - Abstr. of the Soviet Papers Submitted to the 15th General Assembly of the Union of Geodesy and Geophysics on Atmospheric Electricity. Moscow, 1971, p. 14.

Prüller P., Reinet J. Hygienical and biometeorological significance of atmospheric ionization. - Symp. on Aeroionotherapy, Budapest, 1972, p. 43-48. Bibl. 4 ref.

Prüller P., Reinet J. Investigation of atmospheric ion spectra and the hygienical and biometeorological significance of ionization. - Intern. Assoc. of Meteorology and Atmospheric Physics. Report of the 15th General Assembly, Moscow, 1971. Toronto, 1972, p. 163 (IAMAP Publ. 15).

Prüller P., Reinet J. Investigation onto atmospheric ions and electroaerosols conducted at Tartu, Estonian SSR. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 192.

Pöder H., Lepp U., Reinet J. On the functional state of the cardiorespiratory system of patients with rheumatic valvular insufficiency receiving treatment with negative aerosol. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 207.

Reinet J. Counter of atmospheric ions and electroaerosols UT-6914. - Symp. on Aeroionotherapy. Budapest, 1972, p. 33-35. Bibl. 1 ref.

Reinet J. On counters of atmospheric ions and electroaerosols. - Symp. on Aeroionotherapy. Budapest, 1972, p. 37-41. Bibl. 12 ref.

Reinet J. Electroaerosol generators and their application in medicine. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 182.

Reinet J. Electroaerosol generators and their application in medicine. (Elektroaerosol-Erzeuger und ihre medizinische Anwendung) - Aerosole. Inhalation. Hausmitteilung der Firma C. Heyer GmbH 5427. Bad Ems, 1975, N 12, p. 7-8.

Reinet J., Visnapuu L. New electroaerosol generators used in medicine. - Biometeorology, 1975, vol. 6, P. 1.

Proc. of the 7th Intern. Biometeorological Congr., p. 133-134. Suppl. to vol. 19, 1975 of the Intern. J. of Biometeorology.

Reinet J., Raudam E. On the action of ionized medical oxygen. - Intern. Congr. Recent Advances on Biometeorology and Practical Applications of Natural and Stimulated Climate. Ancona (Italy), 1976. Reprint of Sci. Program., p. 17-18.

Reinet J., Sula E., Visnapuu L. A pneumatic aerosol generator for group vaccination. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAem) Abstr. Warszawa, 1977, abstr. 35.

Reinet J., Sula E. Modelling of group vaccination in a closed room. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAem). Abstr. Warszawa, 1977, abstr. 71.

Reinet J., Sula E., Visnapuu L. A pneumatic generator of aerosols for group vaccination. - Z. Erkrankungen der Atmungsorgane, 1970, Bd. 151, S. 138-147. Bibl. 5 ref.

Salm J. Uued mõõteriistad. - Edasi, 1977, 20. juuli.

**Салм Я. Новые измерительные приборы.**

Sibul S. Effect of electro-aerosols on the blood acid-base balance in respiratory and metabolic acidosis. - Biometeorology, 1972, vol. 5, P. 1. 6th Intern. Biometeorological Congr. Nordwijk (Netherlands), p. 144. Suppl. to vol. 16, 1972 of the Intern. J. of Biometeorology.

Sibul S. Effect of electroaerosols on the nose as a reflex organ. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 214.

Sibul S. Effect of heated and cool electroaerosols on the nasal mucosa in patients with allergic rhinopathy. - Biometeorology, 1975, vol. 6, P. 1. Proc. 7th Intern. Biometeorological Congr., p. 135. Suppl. to vol. 19, 1975 of the Intern. J. of Biometeorology.

Sibul S. On the study of the action of electroaerosols by the luminescence method in patients with allergic rhinopathy. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAem). Abstr. Warszawa, 1977, abstr. 74.



Sibul S., Priimägi L. Teine rahvusvaheline kongress aerosoolide kasutamiseks meditsiinis 20. - 22. apr. 1977 Varssavis. - Nõukogude Eesti Tervishoid, 1977, nr. 5, lk. 455.

Сибуль С., Приймаги Л. Второй международный конгресс по применению аэрозолей в медицине в Варшаве с 20 по 22 апреля 1977 г.

Siirde E. Observations on the physiological effect of electroaerosols on man. - *Biometeorology*, 1969, vol. 4, P. 2. Proc. of the 5th Intern. Biometeorological Congr. held at Montreux, Switzerland, p. 140. Suppl. to vol. 13, 1969 of the Intern. J. of Biometeorology.

Siirde E. Effect of hydroaero- and aero-ions on the isolated heart of the frog. - *Symp. of Aeroionotherapy*. Budapest, 1972, p. 53-55.

Siirde E., Jents A. Comparative observations on the effect of aerosols and electroaerosols on the mucous membrane. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 215.

Siirde E., Reinet J., Sibul S., Jents A. Über die Wirkung von Elektroaerosolen auf die Schleimhaut der oberen Atemwege. - *Symp. "Schleimhaut der Atemwege und Aerosole"*. Kurzfref. Bad Salzungen, 1974, S. 9.

Siirde E., Jents A. Comparative observations on the effect of aerosols and electroaerosols on the mucous membrane. (Vergleichende Beobachtungen über die Wirkung von Aerosolen und Elektroaerosolen auf die Schleimhaut). - *Aerosole. Inhalation*. Hausmitteilung der Firma Carl Heyer GmbH 5427. Bad Ems, 1975, H. 12, S. 14.

Siirde E., Reinet J. Effect of electroaerosols and aerosols on the isolated heart of the frog. - *Biometeorology* 1975, vol. 6, P. 1. Proc. of the 5th Intern. Biometeorological Congr. held at Montreux, Switzerland, p. 135-136. Suppl. to vol. 19, 1975 of the Intern. J. of Biometeorology.

Siirde E., Reinet J., Sibul S., Jents A. Über die Wirkung von Elektroaerosolen auf die Schleimhaut der oberen Atemwege. - *Hausmitteilung der Firma Carl Heyer GmbH*. Bad Ems, 1976, H. 13, S. 38.

Smirnova L.A., Visnapuu L.J. A new principle of construction of ejection atomizers. - 2nd Congr. of Intern. Society for Aerosols in Medicine (IGAeM). Warszawa, 1977, abstr. 39.

Sula E., Reinet J. Determination of the efficiency of the aerosol method of group vaccination. 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 219.

Tammet H.F. The aspiration method for the determination of atmospheric-ion spectra. Jerusalem, 1970. 200 p. (Transactions of the Tartu State University 195). Rev. and adapt. transl. orig. 1969 .

Tammet H., Salm J. The resolving power of the air-ion mobility spectrometer. - Abstr. of the Soviet Papers Submitted for the 15th Gen. Assembly of the Union of Geodesy and Geophysics on Atmospheric Electricity. Moscow, 1971, p. 16.

Tammet H., Salm J. Some methodological notes of aerionometry. - Symp. on Aeroionotherapy. Budapest, 1972, p. 49-52. Bibl. 2 ref.

Tammet H., Salm J. The resolving power of the air-ion mobility spectrometer. - Intern. Assoc. of Meteorology and Atmospheric Physics. Report of Proc. 15th General Assembly, Moscow 1971. Toronto, 1972, p. 162 (IAMAP Publ. 15).

Tammet H.F., Salm J.J. Present-day status of the aspiration method of measuring the charge density of electroaerosols. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 193.

Trofimov B.A., Mölder U.H., Pickver R.J., Vyalich E.P. Ionization potentials of unsaturated sulphides. Participation of neighboring unsaturated bonds and heteroatoms in the cation-radical stabilization. - 6th Intern. Symp. on Organic Sulphur Chemistry. Abstr. Book. Bangor, 1974, A 2.

Veimer V.A., Kudu K.F. Observation of HF point-to-plane discharge development phases. - 9th Intern. Conf. Phen. Ionized Gases. Contr. Papers. Bucharest, 1969, p.285. Bibl. 4 ref.

Veimer V., Kudu K. The development phases of HF point-

to-plane corona. - 10th Intern. Conf. Phen. Ionized Gases, Contr. Papers. Oxford, 1971, p. 165. Bibl. 2 ref.

Veimer V.A. Photoelectric investigation of the initial stages of a unipolar HF discharges. - Proc. 2nd Intern. Conf. Gas Discharges. London, 1972, p. 257-259.

Visnapuu L., Tamm E., Reinet J., Smirnova L. An electroaerosol inhaler with a preheating device. - 1st Intern. Congr. on Aerosols in Medicine. Baden/Wien, 1973, p. 183.

### И з о б р е т е н и я

А.с. 30685I (СССР). Аэрозольный ингалятор /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Л.Ю. Виснапуу, Э.И. Тамм, Я.Ю. Рейнет, Л.А. Смирнова. - Заявл. 13.04.70 № I426604/3I-I6; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 197I, № 20, с. I6.

А.с. 307794 (СССР). Электроаэрозольный аппарат для вакцинации животных /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет. - Заявл. 15.08.69 № I359873/30-I5; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 197I, № 2I, с. I8.

А.с. 3I4527 (СССР). Распылитель для электроаэрозольной терапии /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Л.Ю. Виснапуу. - Заявл. 30.03.70 № I42I675/3I-I6; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 197I, № 28, с. 2I.

А.с. 337I33 (СССР). Распылитель /Всесоюз. науч. иссл. ин-т мед. приборостроения; Авт. изобрет. Л.А. Смирнова, В.А. Прошин, Л.Ю. Виснапуу, О.Н. Максимова, А.А. Горайнова. - Заявл. 29.12.70 № I606990/3I-I6; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1972, № I5, с. I6-I7.

А.с. 344862 (СССР). Устройство для дезинфекции емкостей /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет, Л.Ю. Виснапуу, Э.И. Тамм. - Заявл. 30.12.69 № I39I398/3I-I6; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1972, № 22, с. I9.

А.с. 3684II (СССР). Устройство для подавления пыли /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет. - Заявл. 28.II. 69 № I3805I6/22-3; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 9, с. I22.

**А.С. 3757I1 (СССР). Аспирационный счетчик аэроионов** /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Х.Ф. Таммет, Э.Ю. Ютс, М.Э. Лепик. - Заявл. 11.03.68 № 1224430/26-25; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 16, с. 131.

**А.С. 3757I2 (СССР). Автоматический счетчик ионов** /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. В.Я. Ирд, О.В. Сакс. - Заявл. 11.01.71 № 1609862/26-25; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 16, с. 131.

**А.с. 385586 (СССР). Генератор аэрозолей** /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Э.В. Сула. - Заявл. 15.02.71 № 1628244/31-16; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 26, с. 11.

**А.с. 387744 (СССР). Распылитель с индуцирующим электродом** /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Л.Ю. Виснапуу. - Заявл. 28.12.70 № 1605158/23-26; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 28, с. 27.

**А.с. 389789 (СССР). Электроаэрозольный аппарат для вакцинации животных** /Тарт. гос. ун-т. и Лит. науч.-исслед. ин-т ветеринарии; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет, Э.В. Сула, И.И. Бартинкас, Ю.М. Добилас. - Заявл. 09.02.72 № 1746328/30-15; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 30, с. 14.

**А.с. 395088 (СССР). Генератор электроаэрозолей** /Всесоюз. науч.иссл. ин-т мед. приборостроения; Авт. изобрет. Л.А. Смирнова, А.С. Перельмутр, Л.Ю. Виснапуу, В.А. Прошин, А.А. Горяйнова, О.А. Максимова, Д.М. Бердичевский, М.Д. Талалай, Б.С. Кузьменков, И.Г. Немчинов. - Заявл. 13.08.71 № 1692058/31-16; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1973, № 35, с. 14-15.

**А.с. 418220 (СССР). Установка для нанесения покрытий в электростатическом поле** /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет, Л.Ю. Виснапуу. - Заявл. 15.07.68 № 1257649/23-5; Оpub. в Открытия изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1974, № 9, с. 20.

**А.с. 432644 (СССР). Коллектор зарядов, например, электростатического генератора** /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет. - Заявл. 04.07.69 № 1345053/26-25; Оpub. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1974, № 22, с. 178.

А.с. 46488I (СССР). Устройство для измерения электропроводности воздуха /Гл. Геоф. Обсер. в Ленингр.; Авт. изобрет. Х.Ф. Таммет, Я.М. Шварц. - Заявл. 09.10.73 № 1964070/18-10; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1975, № II, с. 125.

А.с. 46576I (СССР). Нейтрализатор зарядов статического электричества /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет, Э.А. Тетсов. - Заявл. 05.05.69 № 1333239/26-25; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1975, № 12, с. 118.

А.с. 490027 (СССР). Измеритель малых постоянных токов /Тарт. завод контрольной аппаратуры.; Авт. изобрет. О.В. Сакс, В.Я. Ирд. - Заявл. 13.04.71 № 1642835/18-10; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1975, № 40, с. 107.

А.с. 495489 (СССР). Дроссельное устройство /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. М.У. Арольд, Э.И. Тамм. - Заявл. 03.08.70 № 1464758/25-8; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1975, № 46, с. 92.

А.с. 515514 (СССР). Ингалятор /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Л.Ю. Виснапуу, В.А. Прошин, Л.А. Смирнова, м.Л. Тадалай. - Заявл. 06.09.74 № 2059421/28-13; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1976, № 20, с. 12.

А.с. 517083 (СССР). Регистратор атмосферных ионов /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет, Р.Л. Матизен, Э.Ю. Кюс. - Заявл. 19.12.74 № 2086502/26-25; Оpubл. в Открытия, изобрет. пром. образцы, товарн. знаки, 1976, № 21, с. 181.

А.с. 519223 (СССР). Электроаэрозольный генератор /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет, Э.В. Сула, Э.А. Тетсов, Э.Р. Яегер. - Заявл. 17.03.75 № 2114104/23-5; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1976, № 24, с. 19.

А.с. 529507 (СССР). Счетчик аэроионов /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.И. Салым. - Заявл. 06.09.74 № 2058224/26-25; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1976, № 35, с. 129.

А.с. 578525 (СССР). Печь для сжигания сточных вод /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. А.А. Кирм, У.А. Паутс. - Заявл. 28.06.76 № 2377945/29-33; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1977, № 40, с. 116.

А.с. 586514 (СССР). Регистратор атмосферных ионов /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Р.Л. Матизен, Я.И. Салым, Э.А.Тетсов, Э.Ю. Мис. - Заявл. 08.12.75 № 2196439/18-25; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1977, № 48, с. 165.

А.с. 588667 (СССР). Нейтрализатор для снятия зарядов статического электричества /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. Я.Ю. Рейнет. - Заявл. 15.09.69 № 1360354/18-25; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1978, № 2, с. 174.

А.С. 633575 (СССР). Устройство для смешивания жидкостей /Тарт. гос. ун-т.; Авт. изобрет. У.А. Паутс, А.А. Кирм. - Заявл. 21.10.76 № 2412973/23-26; Оpubл. в Открытия, изобрет., пром. образцы, товарн. знаки, 1978, № 43.

# СОДЕРЖАНИЕ

АНСО М.Х. Методы повышения бустродействия электрометрических измерителей малых токов .....	3
АНСО М.Х. Метод идентификации высокоомного измерительного резистора на ЭВМ .....	16
ХЯММАЛОВ Ю.А. Анализ работы электростатического динамического конденсатора с натянутой мембраной .....	21
САКС О.В., ХЯММАЛОВ Ю.А., ШОР В.Г. Динамический конденсатор с электростатическим возбуждением ДК-79 .....	37
ТАММЕТ Х.Ф. Кусочно-линейная модель спектра в аэроионных и аэрозольных измерениях .....	45
ТАММЕТ Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей .....	55
ЛЕШНИК К.П., ТАММЕТ Х.Ф., МИЛЛЕР Ф.Г., САЛЫМ Я.И. Полевой измеритель проводимости воздуха с модулирующим конденсатором .....	80
НОПШЕЛЬ М.Г., ТАММ Э.И. О разрядке униполярно заряженных аэрозольных частиц .....	84
САЛЫМ Я.И. Об электростатическом рассеивании аэроионов .....	95
ВИСНАПУУ Л.Д. Об эффективности струйных нейтрализаторов статического электричества .....	101
АЙНТС М.Х., ЖАВОРОНКОВ В.И., ХАЛЫСТЕ А.Я. Индикатор для исследований слабосветящихся объектов ..	106
<b>ПРОМЛЕР П.К.</b> Основание, структура и обзор деятельности Проблемной Лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей .....	III
<b>ПРОМЛЕР П.К.</b> (составитель). Список научных работ и изобретений сотрудников Проблемной лаборатории аэроионизации и электроаэрозолей ТГУ за 1969-1978 гг. ....	127

# CONTENTS

M. ANSO. Method of identification of shunt resistor in high speed electrometers. ....	3
M. ANSO. Methods of improving of high speed microcurrent measurements .....	16
J. HÄMMALOV. An analysis of the operation of an electrostatic dynamic capacitor with a taut membrane .....	21
O. SAKS, J. HÄMMALOV, V. SHOR. The electrostatically driven capacitor DK-79 .....	37
H. TAMMET. A piecewise linear model of the spectrum for the measurement of air ions and aerosols. ....	45
H. TAMMET. On the techniques of aerosol electrical granulometry .....	55
K. LEPPIK, H. TAMMET, F. MILLER, J. SALM. An air conductivity meter with a modulating measuring capacitor .....	80
M. NOPPEL, E. TAMM. On discharging unipolarly charged aerosol particles .....	84
J. SALM. On the electrostatic scattering of air ions..	95
L. VISNAPUU. On the efficiency of jet neutralizers of static electricity .....	101
M. AINTS, V. ZHAVORONKOV, A. HALJASTE. An indicator for optical investigations of weakly luminous objects .....	106
<b>P. PRÜLLER</b> , Research Laboratory for Air Ionization and Electroaerosols of Tartu State University, its foundation, structure and a survey of its activities .....	III
The PAPERS and INVENTIONS of scientific workers of the Research Laboratory for Air Ions and Electro-aerosols in 1969-1978 (compiled by <b>P. PRÜLLER</b> )	127



УДК 621.375.024  
621.317.723

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МАЛЫХ ТОКОВ. Ансо М.Х.

- Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. 3-15.

Дан аналитический обзор известных методов повышения быстродействия линейных электрометров. Показано, что возможности всех этих методов в значительной степени зависят от того, насколько точно мы знаем эквивалентную схему измерительного резистора. На основе теоретических соображений и экспериментальных данных предложена более точная эквивалентная схема измерительного резистора, исходя из которой удалось примерно на порядок повысить быстродействие электрометра.

Илл. 9. Библ. 20. Рез. англ.

УДК 62.501  
621.317.723

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЫСОКООМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РЕЗИСТОРА НА ЭВМ. Ансо М.Х. - Уч. зап.

Тартуского гос. ун-та, 1980, вып. 534 с. 16-20.

Предложен метод определения значений элементов эквивалентной схемы измерительного резистора на основе экспериментальной записи переходной характеристики электрометра. Метод заключается в решении системы нелинейных уравнений методом наименьших квадратов. Пределы и точность сходимости метода слабо зависят от шума.

Илл. 1. Библ. 5. Рез. англ.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА С НАТЯНУТОЙ МЕМБРАНОЙ.

Хаммалов Ю.А. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. 21-36.

В статье проанализирована работа электростатического динамического конденсатора (ДК) с однородно натянутой мембраной. Результаты анализа могут служить основой при конструировании такого ДК.

Решение уравнения движения колеблющейся мембраны под действием силы электростатического притяжения математически сложная задача, поэтому в данной работе мембрана заменена эквивалентной ей пружинно-пластинчатой колебательной системой. Рассмотрена работа такой колебательной системы при малых и больших амплитудах колебания. При малых амплитудах колебания уравнение движения пружинно-пластинчатой колебательной системы легко решается. При больших амплитудах колебания система нелинейна из-за нелинейности силы электростатического притяжения. В этом случае уравнение движения колебательной системы невозможно решить без применения приближенных методов решения. В данной работе применен метод последовательных приближений. Показано, что нелинейность колебаний мембраны вызывает искривление ее резонансных кривых.

Выведена формула для определения коэффициента модуляции ДК с натянутой мембраной.

Илл. 4. Библ. 7. Рез. англ.

УДК 621.319.43

ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДК-79. Сакс О.В., Хямяля Ю.А., Шор В.Г. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. 37-44.

Описана конструкция динамического конденсатора ДК-79 с электростатическим возбуждением. В качестве подвижного электрода в нем применена тонкая натянутая стальная мембрана.

Приведены основные технические характеристики ДК-79, при этом зависимость его резонансных характеристик от температуры и напряжения возбуждения дана графически. Показано, что при довольно больших напряжениях возбуждения резонансные кривые ДК-79 искривлены.

ДК-79 может работать в интервале температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  на частоте модуляции около 5 кГц. При этом номинальный коэффициент модуляции составляет  $0,2+0,25$ , а максимальный доходит до 0,6.

Илл. 4. Библ. 4. Рез. англ.

УДК 551.594.13

КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРА В АЭРОИОННЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ. Таммет Х.Ф. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. 45-54.

Предложено линейное разложение спектра по кусочно-линейным элементарным спектрам. Проанализированы кусочно-линейные модели для спектра проводимости по подвижности и для спектра концентрации аэрозоля по размеру частиц. Выведены формулы для вычисления элементов аппаратных матриц спектрометра аэроионов и гранулометра аэрозолей.

Илл. 1. Библ. 5. Рез. англ.

УДК 541.182.2/3  
551.508  
621.319.7.001

К ТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГРАНУЛОМЕТРИИ АЭРО-  
ЗОЛЕЙ. Таммет Х.Ф. - Уч. зап. Тартуского гос.  
ун-та, 1980, вып. 534, с. 55-79.

Построена математическая модель униполярного трансвер-  
сального зарядника аэрозолей. Выяснена роль электрического  
поля в преимущественно диффузионном заряднике. Проведен ана-  
лиз функции подвижности частиц в зависимости от параметров  
зарядника. Описаны метод компенсационной зарядки, метод дез-  
активации воздуха обратной зарядкой, эффект фокусирования.  
Рассмотрены основные схемы униполярных зарядников. Обсуждены  
проблемы использования модуляционной техники в грануломет-  
рии. Описаны метод модуляции зарядником и РС-режим измерения  
силы тока в модуляционном гранулометре.

Илл. 7. Библ. 7. Рез. англ.

УДК 551.508.941.3;  
621.317.792

ПОЛЕВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУХА С  
МОДУЛИРУЮЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОНДЕНСАТОРОМ.

Лепник К.П., Таммет Х.Ф., Миллер Ф.Г.,  
Салым Я.И. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та,  
1980, вып. 534, с. 80-83.

Модулирующий измерительный конденсатор в измерителе про-  
водимости воздуха аспирационного типа делает непрерывное из-  
мерение проводимости воздуха в полевых условиях более надеж-  
ным: измеритель переменного тока проводимости с низким вход-  
ным сопротивлением не предъявляет к изоляции измерительного  
конденсатора жестких требований. В статье описываются конст-  
рукция, параметры и результаты первых испытаний такого при-  
бора.

Илл. 2. Библ. 3. Рез. англ.

УДК 621.319.7.001

О РАЗРЯДКЕ УНИПОЛЯРНО ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ  
ЧАСТИЦ. Ноппель М.Г., Тамм Э.И. - Уч. зап.  
Тартуского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. 84-94.

Рассматривается теория электрической зарядки (разрядки) аэрозольных частиц, имеющих униполярный начальный заряд, в униполярно ионизированной газовой среде, во внешнем однородном электрическом поле. Численно решается общее дифференциальное уравнение. Для грубых расчетов выведены формулы, учитывающие механизмы ударной и диффузионной зарядки отдельно; рассчитанные по этим формулам кривые кинетики разрядки сравниваются с кривой, полученной решением общего уравнения зарядки.

Библ. 12. Илл. 3. Рез. англ.

УДК 551.594  
537.56

ОБ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАССЕИВАНИИ АЭРОИОНОВ.  
Салым Я.И. - Уч. зап. Тартуского гос. ун-та,  
1980, вып. 534, с. 95-100

Теоретически рассматривается электростатическое рассеивание аэроионов при однородной униполярной ионизации газа. Получены формулы, облегчающие численные расчеты, а также конечная формула в случае наличия двух групп аэроионов со значительно различающимися подвижностями (тяжелых и легких ионов).

Библ. 3. Рез. англ.

УДК 537.222.5

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНЫХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ  
СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. Виснапуу Л.Ю.  
- Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1980,  
вып. 534, с. 101-105.

Приведены экспериментальные сравнительные данные по оценке эффективности нейтрализации статического электричества с помощью пневматического генератора электроаэрозоля и струйного аэроионизатора. Показана, что при расстояниях между нейтрализатором и нейтрализуемым объектом более 1 м и при равных расходах воздуха и заряда генератор электроаэрозоля обладает относительно большей эффективностью нейтрализации, чем аэроионизатор.

Илл. 2. Библ. 6. Рез. англ.

УДК 681.2.084:535.8

ИНДИКАТОР ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СЛАБОСВЕЯЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ. Айнтс М.х., Лаво-  
ронков В.И., Хальясте А.Я. - Уч. зап. Тарту-  
ского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. 106-111.

Описан электронно-оптический индикатор, построенный на основе трехкамерного ЭОП типа У-72М позволяющий на три порядка увеличить яркость изучаемого объекта в диапазоне 400-900 нм. Показаны возможности его использования для исследований в области экспериментальной физики.

Библ. 3 назв. Илл. 5. Рез. англ.

ОСНОВАНИЕ, СТРУКТУРА И ОБЗОР ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ПРОБЛЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ АЭРОИОНИЗАЦИИ И ЭЛЕК-  
ТРОАЭРОЗОЛЕЙ. Прюллер П.К. - Уч. зап. Тарту-  
ского гос. ун-та, 1980, вып. 534, с. III-126.

Лаборатория, основанная в 1964 г., имеет пять секторов: сектор спектрометрии аэроионов, аэрозолей, электрометрии, газового разряда и геофизических наблюдений. В 1978 г. в работе лаборатории принимали участие 62 сотрудника, в том числе 9 кандидатов физ.-мат. наук и 1 кандидат техн. наук.

В 1967 г. группе исследователей из 7 человек была присуждена премия Советской Эстонии за достижения в области науки и техники.

В 1955-77 г. опубликовано 538 научных трудов, из них 64 за рубежом и представлены материалы на 113 научных конференциях, в том числе на 25 международных.

Работники лаборатории имеют по состоянию на I.I. 1979 58 изобретений, на которые выданы авторские свидетельства.

Разработаны различные приборы и устройства, из которых важнейшими являются генераторы электроаэрозолей, выпускаемые также серийно, и счетчики аэроионов. Экономический эффект, полученный от использования этих аппаратов в 1973-77 г. составляет 3 млн. руб.

В 1944-77 г. выполнено 135 хозяйственных работ. Основными заказчиками этих работ были разные научно-исследовательские институты.

Генераторы электроаэрозолей, созданные в лаборатории, успешно использовались в 1965-77 г. в Тартуских клиниках при лечении 19 830 больных.

По вопросам исследования атмосферной ионизации и созданию аппаратуры для изучения ионизации атмосферы, генерации электроаэрозолей, а также для прецизионной электрометрии, лаборатория является одним из ведущих учреждений в СССР и хорошо известна за рубежом.

Библ. 25. Рез. англ.

Ученые записки Тартуского государственного университета.  
Выпуск 534. ИЗМЕРЕНИЯ И ПОМЕХИ. Ионизация, аэрозоли,  
электрометрия II. На русском языке. Резюме на английском  
языке. Тартуский государственный университет. ЭССР, Тар-  
ту, ул. Лийкооли 18. Ответственный редактор Х. Корге. Кор-  
ректоры В. Долгунова, Л. Кивимяги. Сдано в печать 21.07.80.  
МВ 05449. Формат 30x45/4. Бумага печатная № 1. Машино-  
пись. Ротапринт. Учетно-издат. листов 8,86. Печатных  
листов 11,0. Тираж 500. Зак. № 846. Цена 1 руб. 30 коп.  
Типография ТГУ, ЭССР, 202 400. Тарту, ул. Дялсона 14.